



TECNOLOGÍA

en marcha

Contenido

Revisión documental de uso de los aceites esenciales obtenidos de <i>Lippia alba</i> (<i>Verbenaceae</i>), como alternativa antibacteriana y antifúngica Documentary review of essential oils obtained from <i>Lippia alba</i> (<i>Verbenaceae</i>) as microbial and antifungal therapeutic alternative <i>Jovanna Acero-Godoy, Tomas Guzmán-Hernández, Carlos Muñoz-Ruíz</i>	3
Modelación de una antorcha de plasma de arco no transferido Modeling of a non-transferred arc plasma torch <i>Bruno Chinè-Polito, Manuel Mata-Coto, Ivan Vargas-Blanco</i>	12
Potencia Reactiva: Despacho Óptimo con una programación lineal-PARTE A Reactive Power: Optimal Dispatch with linear programming-PART A <i>Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez</i>	25
Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica Composting of biodegradable wastes from the university restaurant at Tecnológico de Costa Rica <i>Raizeth Chaves-Arias, Roel Campos-Rodríguez, Laura Brenes-Peralta, María Fernanda Jiménez-Morales</i>	39
A Multi-Agent System Framework for Miniaturized Satellite Systems (Plataforma de desarrollo software basado en agentes para sistemas satelitales miniaturizados) <i>Carmen Chan-Zheng, Johan Carvajal-Godínez</i>	54
Use of pruning in the agricultural management of <i>Jatropha curcas</i> (<i>Jatropha</i>) for the plant flower development, in Costa Rica Uso de podas en el manejo agrícola de <i>Jatropha curcas</i> (<i>tempate</i>) sobre la expresión floral de la planta, en Costa Rica <i>Ileana Moreira-González, Elizabeth Arnáez-Serrano, Marvin Castillo-Ugalde, Elemer Briceño-Elizondo, Dagoberto Arias-Aguilar</i>	68

Establecimiento de un protocolo de transformación transitoria y estable de <i>Nicotiana tabacum</i> mediada por <i>Agrobacterium tumefaciens</i> Establishment of a transient and stable transformation protocol of <i>Nicotiana tabacum</i> mediated by <i>Agrobacterium tumefaciens</i> <i>Laura Méndez-Muñoz, Sofia Campos-Delgado, Mariel Obando-Coronado, Giovanni Garro-Monge</i>	77
Recuperación de los residuos sólidos en el Tecnológico de Costa Rica a 15 años de la creación de la actividad permanente Manejo de Residuos Institucionales MADI Recovery of solid waste at Costa Rica Institute of Technology 15 years after the creation of the permanent activity Institutional Waste Management MADI <i>Joaquín Jiménez-Antillón, Alina Rodríguez-Rodríguez, Macario Pino-Gómez</i>	92
Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de Pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico Nutrients extraction, growing and production of cucumber in hydroponic protected culture system <i>Carlos Ramírez-Vargas</i>	107
Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México Baseline calculation of greenhouse gases emissions and future projections for the transport sector in the state of Veracruz, Mexico <i>María Concepción Martínez-Rodríguez, Lorena Elizabeth Campos-Villegas, José Jesús Castillo-Monroy</i>	118
Melón (<i>Cucumis melo</i> L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables Melon (<i>Cucumis melo</i> L.) grown under greenhouse conditions: correlations between variables <i>Jose Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	134
Predicción de la vida útil en reparaciones de automóviles Prediction of lifespan in car repairs <i>Alicia Salazar-Hernández, César Garita-Rodríguez</i>	151
Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia Trihalomethane prediction modelling in water distribution systems: calculation of the mean residence time <i>Andrés Araya-Obando, Mark Jones-Sánchez, Luis G. Romero-Esquivel</i>	167
Rentabilidad financiera en la renovación de siembras de café en Los Santos, Costa Rica Financial profitability in the renewal of coffee plantations, in Los Santos, Costa Rica <i>Carlos Díaz-Gutiérrez</i>	179
Mermelada enriquecida con fibra dietética de cáscara de Mango (<i>Mangifera indica</i> L.) Marmalade enriched with dietary fiber from Mango (<i>Mangifera indica</i> L.) peel <i>Magaly Iuit-González, David Betancur-Ancona, Jorge Santos-Flores, Carlos G. Cantón-Castillo</i>	193

Revisión documental de uso de los aceites esenciales obtenidos de *Lippia alba* (*Verbenaceae*), como alternativa antibacteriana y antifúngica

Documentary review of essential oils obtained
from *Lippia alba* (*Verbenaceae*) as microbial
and antifungal therapeutic alternative

Jovanna Acero-Godoy¹, Tomas Guzmán-Hernández²,
Carlos Muñoz-Ruíz³

Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2017
Fecha de aprobación: 18 de abril de 2018

Acero-Godoy, J; Guzmán-Hernández, T; Muñoz-Ruíz, C. Revisión documental de uso de los aceites esenciales obtenidos de *Lippia alba* (*Verbenaceae*), como alternativa antibacteriana y antifúngica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 3-11.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4114>



- 1 Docente Bacteriología Laboratorio Clínico, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá Colombia. Correo electrónico: jacerog@unicolmayor.edu.co
- 2 Docente del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr
- 3 Docente del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: cmunoz51@gmail.com

Palabras clave

Aceites esenciales; *Lippia alba*; acción antimicrobiana.

Resumen

Los antibióticos, son compuestos químicos que se utilizan para erradicar algunos microorganismos patógenos, sin embargo según informes de la OMS, se ha desarrollado resistencia a los antibióticos por parte de algunos microorganismos de importancia clínica; lo cual ha limitado las opciones de tratamiento por parte de los profesionales de la salud a los pacientes. Por lo anterior, se ha visto la necesidad de buscar terapias alternativas como el uso de AE (Aceites Esenciales) de plantas aromáticas como una biosolución a los tratamientos convencionales con muy buenos resultados. Los AE, obtenidos por hidrodestilación de la planta *Lippia alba*, la cual está distribuida ampliamente en Latinoamérica han presentado resultados promisorios por la gran variedad de compuestos volátiles como citral, carvona, mircenolol entre los más abundantes y otros 30 compuestos aproximadamente; la variación en la concentración de los compuestos depende de diversos factores fenotípicos y genotípicos, así como ambientales; diferentes investigaciones han demostrado como la extracción del aceite de las hojas y su uso tanto in vivo como in vitro han presentado actividad bactericida, bacteriostática, antifúngica, antiprotozoal, antitumoral, como sedante para el transporte de animales, como promotor de crecimiento animal, entre otros; esta revisión documental muestra algunas investigaciones realizadas con el aceite esencial de *L. alba* y los resultados obtenidos en las mismas.

Keywords

Oil essentias; *Lippia alba*; antimicrobial action.

Abstract

Antibiotics are chemical compounds that are used to eradicate some pathogenic microorganisms, however, according to WHO reports, some microorganisms of clinical importance; which has limited the options of treatment have developed resistance to antibiotics by the health professionals to the patients. Therefore, it has been necessary to seek alternative therapies such as the use of essential oils of aromatic plants as a biosolution to conventional treatments with very good results. The essential oils obtained by hydrodistillation of the *Lippia alba* plant, which is widely distributed in Latin America, have presented promising results due to the great variety of volatile compounds such as citral, carvone, myrcenolol, among the most abundant and about 30 other compounds; The variation in the concentration of the compounds depends on several phenotypic and genotypic as well as environmental factors. Different investigations have demonstrated how the extraction of the oil from the leaves and their use both in vivo and in vitro have shown bactericidal, bacteriostatic, antifungal, antiprotozoal, antitumor activity, as a sedative for the transport of animals, as an animal growth promoter, among others. This documentary review shows some investigations with the essential oil of and the results obtained in them.

Introducción

Uno de los grandes avances farmacéuticos fue el descubrimiento de los antimicrobianos para el tratamiento de infecciones causadas por bacterias, hongos y protozoos, con el paso del tiempo los microorganismos por medio de métodos de presión y selección se adaptaron

genética y metabólicamente desarrollando genes contra estas moléculas; este tipo de resistencia ha incrementado en forma alarmante durante los últimos años y el descubrimiento de antimicrobianos ha sido cada vez más lento, lo cual ha limitado las opciones de tratamiento disponibles [1, 2]. El problema de resistencia contra antibióticos se agrava en Latinoamérica y África, donde se puede acceder a ellos de forma libre; a nivel de producciones animales son utilizados como promotores de crecimiento animal en dosis subclínicas, por lo tanto es necesaria la búsqueda de alternativas que den respuesta a la falta de opciones terapéuticas a las que se está enfrentando la humanidad.

Los AE de diversas plantas, han demostrado poseer numerosas propiedades medicinales por su actividad antimicrobiana, antiinflamatoria, antiviral, antiprotazoal, insecticida, anticancerígena, como preservante de alimentos entre otras [3, 4, 5, 6]. La planta aromática *Lippia alba* ha sido evaluada en diferentes ensayos como antifúngico, antibacteriano, antitumoral, evidenciando como la extracción de aceites esenciales pueden ser utilizados como alternativas contra la resistencia de los microorganismos.

Aceites Esenciales (AE)

Los AE, son fracciones líquidas volátiles, biosintetizadas por la planta que dan el aroma, característico a flores, arboles, frutos, hierbas, especies y semillas; en la planta cumplen diversas funciones tales como defensa química, actuar contra depredadores de insectos, microorganismos y otros tipos de plagas, pertenecen principalmente a las familias *Apiaceae*, *Lauraceae*, *Myristicaceae*, *Lamiaceae*, *Asteraceae*, *Myrtaceae*, *Rosaceae*, *Piperaceae*, *Verbenaceae* y *Rutaceae*; los AE se encuentra en las estructuras celulares de la epidermis, más específicamente de las glándulas secretoras especializadas conocidas como tricomas glandulares. Para su obtención el material vegetal es sometido a vapor de agua y libera compuestas por hidrocarburos terpénicos y sus derivados oxigenados, alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres, ésteres, compuestos fenólicos, fenilpropenoides entre otros, estos compuestos están siendo estudiados como una posible alternativa contra la alta resistencia antimicrobiana que se presenta por parte de algunas bacterias patógenas que afectan plantas, humanos y animales [7, 8, 9, 10, 11].

Lippia alba y quimiotipos de aceites esenciales

Lippia alba (Mill.) N.E. Br, pertenece al reino de las plantas, división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida, orden Lamiales, familia *Verbenaceae*; es una planta constituida por 175 géneros y 2.800 especies, se encuentra desde Texas hasta Argentina a alturas de 1.800 m.s.n.m, ha sido encontrada también en la India y en Australia, dependiendo de la ubicación geográfica recibe diferentes nombres comunes como: bálsamo de limón (Brasil), Juanilama (Costa Rica), quita dolor (Cuba), salvia santa (Guatemala), hierba buena (México), prontoalivio (Colombia), salvia morada (Argentina), hierba luisa (Venezuela); es una hierba perenne, algunas veces arbusto hasta de 1,7 m de altura, con un fuerte olor a limón, lima o menta. Presenta hojas membranáceas, pecioladas, pubescentes, opuestas o ternadas y su extremidad muestra formas variable con un ápice puntiagudo, cuneiforme o decumbente y la frontera dentada (excepto sobre la base); posee flores aromáticas o no, de color azul a rosado, lila a violeta, algunas veces blanca o amarilla en la superficie interna; ha sido utilizada de forma popular para el tratamiento de la hipertensión, problemas digestivos, náuseas, problemas cardiovasculares, resfriados, asma y tos; además se le han atribuido propiedades sedantes, ansiolíticas, antiulceras, antifúngicas, antimicrobianas, antiprotazoal, antioxidantes, antiespasmódicas, anticonceptivas y antiinflamatorias; la planta presenta gran variedad química y morfológica [12, 13, 14, 15, 16, 17, 8, 18, 19, 20].

Debido a la creciente resistencia a agentes microbianos y drogas sintéticas *Lippia alba* ha cobrado gran importancia de estudio por ser una planta aromática que posee propiedades como su plasticidad fenotípica [21, 3]. A nivel de la raíz está constituida por terpenoides, felinpropanoides y azúcares; a nivel de hojas y flores exhibe una gran variedad de quimiotipos con respecto a los aceites esenciales como son: I. Citral (geranial y neral), linalol, β -cariofileno, como principales constituyentes (4 subtipos). II. Tagetenona, III. Limoneno con cantidades variables de carvona, pero se pueden encontrar cetonas monoterpénicas relacionadas con la biosíntesis (dihidrocarvona, piperitona, piperitenona), IV. Mirceno, V γ terpineno VI. alcanfor-1,8- Cineol y VII Estragole y algunas combinaciones como Citral-mirceno, citral limoneno, citral β -cariofileno, citral germacreno-D, carbonalimoneno y limonenopiperitona, y biciclosesquifelandreno [13, 16, 21].

En la composición química de la planta se han cuantificado diferentes metabolitos secundarios no volátiles como cumarinas, quinonas, lactonas terpénicas, flavonoides, biflavonoides, taninos, iridoides, glicósidos de feniletanoide, fenilpropanoides y saponinas triterpeno. Las variaciones cuantitativas y cualitativas de los compuestos de la planta se deben al genotipo y condiciones edafoclimáticas, y la técnica de extracción; una gran variedad de estudios realizados por medio de la técnica de hidrodestilación se recupera una gran variedad de los AE que presenta la planta [21, 17, 20, 22, 23, 14].

Actividad antibacteriana

Existen múltiples mecanismos por medio de los cuales los aceites esenciales inhibirían el crecimiento bacteriano, explicados por diferentes autores, como causar fuga de iones y contenido citoplasmático produciendo la muerte celular mecanismo efectivo del cinamaldehído que se ha encontrado que daña la membrana citoplasmática e inhibe el desarrollo del septo y causa el alargamiento celular, así como induce estrés oxidativo [14]. La capacidad que tienen de romper la membrana externa de bacterias gram negativas, liberando liposacáridos y aumentando su permeabilidad al ATP [24]. La toxicidad de los AE hacia los microorganismos se asocia con el carácter lipófilo y el bajo peso molecular de sus componentes, lo cual permitiría que el AE rápidamente atravesara las membranas celulares, provocando cambios en su estructura y funciones, con cambios de permeabilidad [9].

Algunos microorganismos por medio de mecanismos quorum sensing (QS) producen señales de comunicación intercelular, este tipo de modulación permite a muchas especies patógenas la infección efectiva del huésped; el uso de moléculas antiQS como los AE, inhibiría la proliferación celular de este tipo de microorganismo [25]. Los AE de *Lippia alba* fueron utilizados por Olivero y colaboradores en el 2014, contra la bacteria *Chromobacterium violaceum*, para determinar su actividad citotóxica y la producción de violaceína, además del potencial antimicrobiano del AE contra la bacteria *S. aureus*. Los resultados obtenidos en el estudio determinaron que a mayores concentraciones del AE se produjo un impacto proporcional en el crecimiento celular, excepto con el AE que contenía el mayor contenido de geraniol (9,5%) contra *C. violaceum*; la mayor inhibición de QS se observó para el AE de *L. alba* con la concentración más alta de geranial y neral, esto comprobaría la actividad antiQS de los AE, como un factor independiente del crecimiento celular; el ensayo de AE contra *S. aureus* presentó inhibición, lo cual determina que efectivamente este tipo de aceites tienen potencial como sustancias antimicrobianas para el crecimiento de bacterias de importancia clínica [25].

En el estudio realizado por Santos y colaboradores, con el AE de *L. alba* fue enfrentado contra las bacterias *Escherichia coli*, *Serratia marcescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus epidermidis* y *Enterococcus faecalis*. Los resultados mostraron que *E. coli* presenta una inhibición de crecimiento por encima del 80%, *S. epidermidis*, *E. faecalis* y *S. marcescens* fueron sensibles al AE de *L. alba* a una concentración de 4.0 mg/mL y con un porcentaje de inhibición inferior al 70%; *P. aeruginosa* no presentó sensibilidad, lo cual podría explicarse porque es un patógeno

que últimamente ha sido ampliamente reportado como bacteria multirresistente a diferentes tipos de antibióticos y sustancias antimicrobiales [19].

En un estudio de García y colaboradores en 2014 con AE de *L. alba* contra las bacterias *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *R. pickettii*, y *E. cloacae*; los resultados obtenidos en el estudio demostraron que todos los microorganismos ensayados fueron susceptibles a las concentraciones evaluadas; además, no existían además reportes sobre la susceptibilidad de las especie *Ralstonia pickettii* ni, *E. cloacae*, frente a aceites esenciales, sin embargo son oportunistas nosocomiales que dada la resistencia a antibióticos que se presenta actualmente están cobrando gran importancia clínica [17].

En el mismo año Feitosa y colaboradores utilizaron AE de *L. alba* de hoja seca y hoja fresca, contra *Escherichia coli*, *Listeria innocua*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella choleraesuis*, *Staphylococcus aureus*; se determinó además la concentración mínima inhibitoria (CMI) y la concentración mínima bactericida (CMB). Los resultados obtenidos del AE de *L. alba* mostraron actividad antimicrobiana en todas las concentraciones ensayadas con un amplio espectro de actividad, inhibiendo el crecimiento tanto de bacterias gram positivas como de gram negativas, la bacteria más sensible al AE obtenido de hojas secas fue *S. aureus* seguida por *L. innocua*. El aceite de hoja fresca presentó mayor eficiencia que el aceite de hoja seca contra la bacteria probada, excepto *L. innocua*. Los resultados de CMI y CMB con AE de hojas secas y hojas frescas de *L. alba*, demostraron una gran capacidad como potenciales antimicrobianos sobre todo contra *S. aureus*; los demás microorganismos evaluados en este estudio presentaron CMI y CMB a diferentes concentraciones; *P. aeruginosa* presentó CMI y CMB de 9,37mg/mL y 5,34 mg/mL de hoja fresca y seca respectivamente lo cual corrobora al igual que en el estudio de Santos que *P. aeruginosa* es una bacteria a la cual se le debe prestar especial atención a nivel de investigación en el tema de aceites esenciales, por la resistencia antibacteriana tanto a antibióticos convencionales como la poca inhibición que presenta ante el AE de *L. alba* [19, 9].

Actividad antifúngica

En la caracterización química que se le ha realizado a *L. alba*, se ha determinado que posee diferentes sustancias que pueden tener actividad antifúngica, contra hongos patógenos humanos y de animales [26]. Un estudio realizado en 2016 por Glamočlija y colaboradores evalúan la actividad antifúngica de *L. alba* cuyos AE fueron probados contra los hongos *Aspergillus ochraceus*, *Aspergillus versicolor*, *A. niger*, *A. fumigatus*, *Penicillium ochrochloron*, *Penicillium funiculosum*, *Trichoderma viride*, se determinó la CMI y la concentración mínima fungicida (CMF); los resultados del estudio demostraron una actividad media a moderada para el AE de *L. alba*, el cual tuvo una CMI en un rango de 0,300-1,250 mg/mL, y CMF en un rango de 0,600-1,250 mg/mL para los hongos probados en el estudio, con lo cual se demuestra que el aceite esencial puede ser una opción antifúngica contra determinados hongos que puedan producir intoxicación micromicetal en producción de hongos alimenticios, enfermedades en humanos y animales entre otros [15].

Santos y colaboradores para el 2016 reportaron un ensayo de AE contra las levaduras *Candida dubliniensis*, *Candida tropicalis*, *Candida glabrata*, *Candida parapsilosis*, *Candida krusei*, *Candida albicans*, *Cryptococcus grubii*, *Cryptococcus gattii*, *Cryptococcus gattii*, *Cryptococcus neoformans* y *Saccharomyces cerevisiae*. Los resultados mostraron que todas las levaduras presentaron sensibilidad al AE en concentraciones entre los 0,5 y 2,0 mg/mL, cobrando vital importancia *C. dubliniensis* que fue inhibida a los 0,5 mg/mL quien es frecuentemente aislada en cavidades orofaríngeas de pacientes VIH positivos, con estos resultados podría existir un avance en tratamientos alternativos y no tan agresivos a nivel de fármacos para estos pacientes [27,19].

En un estudio realizado por Mesa y Colaboradores se evaluaron los quimitipos citral y carvona para la determinación de la actividad antifúngica contra *Candida parapsilosis*, *Candida krusei*, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus fumigatus*, se realizaron pruebas de CMI. Los resultados arrojados por el estudio determinaron que el aceite quimitipo carvona no mostró ninguna actividad contra los hongos evaluados; los monoterpenos oxigenados presentes en el quimitipo citral, tales como geraniol, citral y R (+) citronelal, mostraron actividad frente a las cuatro cepas ensayadas, sin embargo, citral mostró el valor de CMI más bajo. El citral comercial mostró la mayor actividad contra *A. fumigatus* y *C. krusei*, con valores de CMI de 62,5 µg/mL y 39,4 µg/mL respectivamente; *A. fumigatus* fue más susceptible al aceite quimitipo citral y los monoterpenos geraniol, nerol, citral y R -(+)- citronelal que *A. flavus*; la explicación de estos resultados puede estar dada por la sensibilidad del método utilizado para la evaluación de los mismos, existiendo diferencias significativas si se realiza en medio sólidos o líquidos, además existen terpenos volátiles que pueden presentar interferencia en los resultados [21].

Actividad de aceites esenciales en producciones animales

Las producciones animales son actividades que se realizan de forma intensiva alrededor del mundo, existen factores que pueden afectar negativamente dichas producciones como son: mala calidad del agua, malas prácticas de manejo, condiciones inadecuadas de cría y patógenos [28]; en acuicultura, el proceso de manipulación de los peces para transporte, reproducción y otras actividades genera gran estrés en los animales, por lo tanto es necesario un proceso de sedación o anestesia. En un estudio realizado por Silva en 2017 se obtuvo AE de *Lippia alba* y se evaluó la actividad antimicrobiana de dos isómeros: S-(+)- y R-(-)- linalol contra algunas cepas de *Aeromona hydrophila* y se determinaron CMI y CMB. Los resultados obtenidos mostraron efectos antibacterianos en el isómero S-(+)- con dos de las cepas, pero no contra los demás; no se detectó actividad para la forma R-(-)-, esta investigación discute acerca de la contradicción con los estudios con linalol, ya que algunos autores describen un amplio espectro de acción para este compuesto, mientras que otros solo lo detectan para una bacteria [7].

Majolo y colaboradores realizaron un estudio con AE de *L. alba* diluido contra *Aeromonas hydrophila*, se determinaron la CMI y CMB. Los resultados determinaron que el AE de *L. alba* a una concentración de 5.000 mg.mL⁻¹, inhibía el crecimiento de *Aeromonas hydrophila*, se determinaron además actividades bactericidas y bacteriostáticas con 2.862 mg.mL⁻¹ (CMI) y 5.998 mg.mL⁻¹ (CMB) [24].

En un estudio realizado por Ambrosio en 2016, se realizó la evaluación del AE de *Lippia alba* in vitro, tanto solos o en mezclas sobre aislamientos de bacterias patógenas para cerdos y aves de corral, *Salmonella enteritidis* y *Lactobacillus plantarum*; esto con el fin de determinar el tipo de inhibición ejercido por el aceite tanto con bacterias patógenas como benéficas y conocer la acción que tienen contra microorganismos tipo probióticos y su posible acción a nivel de intestino; el control positivo utilizado fue estreptomocina; los resultados obtenidos en el estudio no fueron significativos para *Lippia alba*, contra *Salmonella enteritidis* ni contra *Lactobacillus plantarum*; los diámetros de la zona de inhibición para las dos bacterias no superaron al control positivo 7,2mm y 7,7mm respectivamente, contra el control que arrojó 17,1mm para *Salmonella* y 8.6mm para *Lactobacillus*, sin embargo en este mismo estudio se probó *Lippia sidoides* que pertenece al mismo género y familia y se presentaron zonas de inhibición con diámetros de 34,7mm para *Salmonella* y 37,8 mm para *Lactobacillus*, contra la estreptomocina que presentó 18 mm y 10,1mm de inhibición respectivamente. Aunque el AE de *Lippia alba*, no presentará diferencias significativas en este estudio, el presente resultado no cierra la posibilidad de utilizar otras plantas de la misma familia para ser utilizadas como sustancias promotoras del crecimiento animal [29].

Evaluación de toxicidad

Una de las principales preocupaciones en la utilización de AE es que puedan presentar algún tipo de efecto tóxico; actualmente, se tienen muy pocos reportes acerca de este fenómeno para poder ser implementados como posibles antimicrobianos en humanos, plantas y animales; se han reportado perfiles citotóxicos a altas concentraciones con daño neurológico motor y hepático [30] por tal razón Aluar y colaboradores en 2016 realizaron un estudio para evaluar la composición química y la toxicidad aguda oral del AE de *L. alba* a dosis únicas y dosis repetida en ratones entre 20-30 g de peso (50 en total entre machos y hembras). La dosis inicial fue de 2.000 mg/kg de peso corporal, donde se obtuvo una letalidad en el 100% de los animales, se adecuaron dosis a 1.500, 900 y 300 mg/kg de peso corporal, hasta lograr la dosis discriminante, (no provoca muerte pero si toxicidad manifiesta), como grupo control se les proporcionó aceite de girasol. Para el ensayo de toxicidad aguda a dosis repetida, se realizó durante 28 días y se suministró 100 mg/kg del AE de *Lippia alba* el cual fue administrado por vía oral utilizando intubación intra gástrica con una cánula curva metálica. Para la dosis de 1.500 mg/kg las hembras tratadas con el AE mostraron una supervivencia del 60 % hasta las 4 horas, mientras que los machos no sobrevivieron. A las dosis de 900 y 300 mg/ kg de peso corporal se observó supervivencia de todos los grupos experimentales (machos y hembras). Los animales (machos y hembras) que recibieron dosis repetidas (28 días) del AE de *L. alba* a la dosis de 100 mg/kg de peso corporal por vía oral, presentó 100% de supervivencia, además de mostrar ganancia de peso a lo largo de las semanas de experimentación. Sin embargo, los machos control y tratados ganaron más peso que las hembras (control y tratadas); no se observaron cambios en los parámetros clínicos entre los grupos (control y tratados) para ambos sexos, durante el período de experimentación El estudio histopatológico de los animales que fallecieron antes de las 24 horas y los animales que sobrevivieron no presentaron alteraciones patológicas en los órganos analizados (corazón, hígado, pulmón, riñón y estómago), con relación al control se observó que la dosis de 900 mg/kg, el aceite esencial de *L. alba*, por vía oral, produjo signos y síntomas de daño neurológico y motor moderado [18]. Lo cual determina que los AE, pueden ser utilizados en dosis pertinentes como antimicrobianos y otros compuestos benéficos para organismos vivos, sin que presente efectos de toxicidad celular.

Conclusiones

Dada la gran cantidad de compuestos químicos, quimioterapéuticos, antibióticos sintéticos que se utilizan a nivel humano, animal, vegetal y ambiental; los AE de diferentes plantas aromáticas son una alternativa terapéutica, de esta forma el AE de la planta *L. alba*, a través de la presente revisión ha demostrado grandes cualidades como sustancia antibacteriana con bacterias de gran importancia clínica como son *S. aureus*, *E. coli*, sin embargo no ejerce acción contra *Pseudomona* que ha sido catalogado como bacteria multirresistente; antifúngica a nivel de infecciones dérmicas lo cual aceleraría la formulación de este tipo de sustancias a nivel de la piel y no ingeridas, con lo cual se pueden presentar efectos tóxicos sino se determinan las dosis ideales.

La gran variedad de quimiotipos que presenta el AE de *L. alba*, estaría relacionado con diferentes factores que varios autores han caracterizado como procedencia geográfica, edad de la planta, sitio de donde se extrae el AE, técnica de recolección del material vegetal y de extracción lo cual incluiría tiempos de hidrodestilación, con lo cual las concentraciones y rendimientos de la planta podrían variar y por lo tanto es necesario poner especial cuidado en la estandarización de este tipo de técnicas para obtener el mayor potencial a nivel de concentración de los compuestos y de esta forma en la realización de los ensayos, sin embargo la técnica de hidrodestilación es una de las más utilizadas para la extracción de los aceites esenciales, ya que es considerada

una técnica económica sencilla y con la cual se obtienen buenos rendimientos biomasa/aceite; siendo en esta revisión la técnica más empleada; además Oliveira y colaboradores revelan que estímulos ambientales pueden redirigir rutas biosintéticas y cambiar la composición química, producción y actividad de los AE; es necesario realizar estudios que determinen las relaciones planta-suelo-microorganismos rizosféricos, los cuales no han sido explorados a fondo y una vez sean conocidos estos factores se pueden tener grandes perspectivas sobre la creación de bancos de germoplasma de una planta tan promisoriosa como es *L. alba*.

Para el crecimiento de los animales en sistemas de producción masivos se han utilizado durante mucho tiempo antibióticos en dosis sub terapéuticas, sin embargo, desde el inicio del uso de los antibióticos aparecieron informes sobre la resistencia en bacterias aisladas del ganado. En consecuencia, surge la preocupación de transferir esa resistencia a patógenos humanos a través de la cadena alimentaria como problema de salud, ya que se estima que al menos el 61% de todos los patógenos son de origen animal (OMS, 2016). En 2000 países como Suecia y Dinamarca prohibieron el uso de antibióticos como promotores de crecimiento animal a través del Reglamento (número 1.831/2003) del Parlamento Europeo y del Consejo el cual se extendió a todos los estados miembros, por lo tanto, debido al aumento de la resistencia bacteriana y restricciones de uso legal se sugieren nuevas alternativas para evitar el uso de estos compuestos para mantener la eficiencia en la producción animal, de esta forma la utilización de AE, surgen como una alternativa estudiada a nivel de las producciones animales, evitando además el problema de resistencia antimicrobiana que se viene presentando en el mundo. Para terminar los AE de *L. alba* se convierten en una biosolución económica, natural y factible que permitiría retomar saberes ancestrales, reconciliarnos con nuestro pasado y nos arriesgar a apostarle al equilibrio y desarrollo sostenible de nuestra generación y de generaciones futuras.

Referencias

- [1] M. Ferri, E. Ranucci, P. Romagnoli, y V. Giaccone, «Antimicrobial resistance: a global emerging threat to public health systems», *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 57, n.o 13, pp. 2857–2876, 2017.
- [2] A. Huttner et al., «Antimicrobial resistance: a global view from the 2013 World Healthcare-Associated Infections Forum», *Antimicrob. Resist. Infect. Control*, vol. 2, n.o 1, p. 31, 2013.
- [3] L. T. García, A. F. Leal, É. M. Moreno, E. E. Stashenko, y H. J. Arteaga, «Differential anti-proliferative effect on K562 leukemia cells of *Lippia alba* (Verbenaceae) essential oils produced under diverse growing, collection and extraction conditions», *Ind. Crops Prod.*, vol. 96, pp. 140–148, 2017.
- [4] A. Orchard, M. Sandasi, G. Kamatou, A. Viljoen, y S. van Vuuren, «The in vitro antimicrobial activity and chemometric modelling of 59 commercial essential oils against pathogens of dermatological relevance», *Chem. Biodivers.*, vol. 14, n.o 1, p. e1600218, 2017.
- [5] P. Souza et al., «Growth inhibition of sulfate-reducing bacteria in produced water from the petroleum industry using essential oils», *Molecules*, vol. 22, n.o 4, p. 648, 2017.
- [6] M. Ruiz-Rico et al., «Enhanced antimicrobial activity of essential oil components immobilized on silica particles», *Food Chem.*, vol. 233, pp. 228–236, 2017.
- [7] L. L. Silva et al., «S-(+)-and R-(-)-linalool: a comparison of the in vitro anti-*Aeromonas hydrophila* activity and anesthetic properties in fish», *An. Acad. Bras. Ciênc.*, vol. 89, n.o 1, pp. 203–212, 2017.
- [8] G. Linde, N. Colauto, E. Albertó, y Z. Gazim, «Quimiotipos, extracción, composición y aplicaciones del aceite esencial de *Lippia alba*», *Rev Bras Plant Med*, vol. 18, pp. 191–200, 2015.
- [9] T. F. Machado, N. A. P. Nogueira, R. de C. A. Pereira, C. T. de Sousa, y V. V. Batista, «The antimicrobial efficacy of *Lippia alba* essential oil and its interaction with food ingredients», *Braz. J. Microbiol.*, vol. 45, n.o 2, pp. 699–705, 2014.
- [10] J. Visvalingam, K. Palaniappan, y R. A. Holley, «In vitro enhancement of antibiotic susceptibility of drug resistant *Escherichia coli* by cinnamaldehyde», *Food Control*, vol. 79, pp. 288–291, 2017.
- [11] E. E. Stashenko, *Aceites esenciales*, Bucaramanga: CENIVAM, 2009.

- [12] T. G. Do Vale, E. C. Furtado, J. G. Santos Jr, y G. S. B. Viana, «Central effects of citral, myrcene and limonene, constituents of essential oil chemotypes from *Lippia alba* (Mill.) NE Brown», *Phytomedicine*, vol. 9, n.o 8, pp. 709–714, 2002.
- [13] T. Hennebelle, S. Sahpaz, H. Joseph, y F. Bailleul, «Ethnopharmacology of *Lippia alba*», *J. Ethnopharmacol.*, vol. 116, n.o 2, pp. 211–222, 2008.
- [14] N. Ara y H. Nur, «In vitro antioxidant activity of methanolic leaves and flowers extracts of *Lippia alba*», *Res. J. Med. Med. Sci.*, vol. 4, n.o 1, pp. 107–110, 2009.
- [15] J. Glamočlija, M. Soković, V. Tešević, G. A. Linde, y N. B. Colauto, «Chemical characterization of *Lippia alba* essential oil: an alternative to control green molds», *Braz. J. Microbiol.*, vol. 42, n.o 4, pp. 1537–1546, 2011.
- [16] A. N. M. Mamun-Or-Rashid, M. K. Sen, M. A. Jamal, y S. Nasrin, «A comprehensive ethno-pharmacological review on *Lippia alba* M», *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 1, pp. 14–20, 2013.
- [17] Y. P. G. Cuellar, A. D. Nuñez, L. L. O. Castillo, J. B. Vanegas, J. C. C. Osorio, y J. I. M. Rodríguez, «Estudio fitoquímico preliminar y de actividad antimicrobiana de la especie *Lippia alba* originaria del Piedemonte Amazónico», *Momentos Cienc.*, vol. 11, n.o 2, 2014.
- [18] Y. Aular, M. Villamizar, Y. Pérez, y V. Pérez, «Composición química y toxicidad aguda oral del aceite esencial de *Lippia alba* en ratones», *Salus*, vol. 20, n.o 1, pp. 43–51, 2016.
- [19] N. Santos et al., «Cytotoxic and antimicrobial constituents from the essential oil of *Lippia alba* (Verbenaceae)», *Medicines*, vol. 3, n.o 3, p. 22, 2016.
- [20] A. C. da Silva, F. G. Barbosa, J. Mafezoli, M. da C. de Oliveira, y T. F. de Oliveira, «HS-SPME as an efficient tool for discriminating chemotypes of *Lippia alba* (Mill.) NE Brown», *Quím. Nova*, vol. 40, n.o 1, pp. 42–46, 2017.
- [21] A. C. Mesa-Arango, J. Montiel-Ramos, B. Zapata, C. Durán, L. Betancur-Galvis, y E. Stashenko, «Citral and carvone chemotypes from the essential oils of Colombian *Lippia alba* (Mill.) NE Brown: composition, cytotoxicity and antifungal activity», *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*, vol. 104, n.o 6, pp. 878–884, 2009.
- [22] B. V. Soares et al., «Antiparasitic activity of the essential oil of *Lippia alba* on ectoparasites of *Colossoma macropomum* (tambaqui) and its physiological and histopathological effects», *Aquaculture*, vol. 452, pp. 107–114, 2016.
- [23] B. V. Soares et al., «Antiparasitic activity, histopathology and physiology of *Colossoma macropomum* (tambaqui) exposed to the essential oil of *Lippia sidoides* (Verbenaceae)», *Vet. Parasitol.*, vol. 234, pp. 49–56, 2017.
- [24] C. Majolo, S. I. B. da Rocha, E. C. Chagas, F. C. M. Chaves, y H. R. Bizzo, «Chemical composition of *Lippia* spp. essential oil and antimicrobial activity against *Aeromonas hydrophila*», *Aquac. Res.*, vol. 48, n.o 5, pp. 2380–2387, 2017.
- [25] J. Olivero-Verbel, A. Barreto-Maya, A. Bertel-Sevilla, y E. E. Stashenko, «Composition, anti-quorum sensing and antimicrobial activity of essential oils from *Lippia alba*», *Braz. J. Microbiol.*, vol. 45, n.o 3, pp. 759–767, 2014.
- [26] M. Soković y L. J. van Griensven, «Antimicrobial activity of essential oils and their components against the three major pathogens of the cultivated button mushroom, *Agaricus bisporus*», *Eur. J. Plant Pathol.*, vol. 116, n.o 3, pp. 211–224, 2006.
- [27] C. Quesada Gómez, L. Murillo Hidalgo, M. Ureña Varela, y E. Vargas Monge, «*Candida dubliniensis*: Caracterización, diagnóstico, Importancia en paciente inmunocomprometidos y diferenciación de *C. albicans* (Revisión Bibliográfica)», *Rev Med Costa Rica Centroam*, vol. 64, n.o 578, pp. 43–8, 2007.
- [28] T. Ellis et al., «Cortisol and finfish welfare», *Fish Physiol. Biochem.*, vol. 38, n.o 1, pp. 163–188, 2012.
- [29] C. M. Ambrosio, S. M. de Alencar, R. L. de Sousa, A. M. Moreno, y E. M. Da Gloria, «Antimicrobial activity of several essential oils on pathogenic and beneficial bacteria», *Ind. Crops Prod.*, vol. 97, pp. 128–136, 2017.
- [30] J. Olivero-Verbel, J. Gueette-Fernandez, y E. Stashenko, «Acute toxicity against *Artemia franciscana* of essential oils isolated from plants of the genus *Lippia* and *Piper* collected in Colombia», *Boletín Latinoam. Caribe Plantas Med. Aromat.*, vol. 8, n.o 5, 2009.

Modelación de una antorcha de plasma de arco no transferido

Modeling of a non-transferred arc plasma torch

Bruno Chinè-Polito¹, Manuel Mata-Coto², Ivan Vargas-Blanco³

Fecha de recepción: 25 de abril de 2018

Fecha de aprobación: 3 de julio de 2018

Chinè-Polito, B; Mata-Coto, M; Vargas-Blanco, I. Modelación de una antorcha de plasma de arco no transferido. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 12-24.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4115>

1 Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: bchine@tec.ac.cr

2 Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: mfmata@tec.ac.cr

3 Escuela de Física. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: ivargas@tec.ac.cr



Palabras clave

Plasma; antorcha de arco no trasferido; modelación; métodos computacionales.

Resumen

Las antorchas de plasma se usan para producir el plasma en la manufactura de materiales e industria energética, donde las antorchas de arco de corriente directa representan los componentes principales de los procesos con plasma térmico (plasma spraying, soldadura, corte de metales, tratamiento de residuos, producción de biogás, etc.). En una antorcha de plasma de arco no trasferido, se desarrolla un arco eléctrico aplicando una corriente directa entre el cátodo y el ánodo de la antorcha. Sucesivamente, el plasma se produce calentando, ionizando y expandiendo un gas alimentado a la antorcha antes de la región del cátodo. Los trabajos de laboratorio que usan técnicas de observación y de medición son de difícil aplicación, debido a las características físicas de estos fenómenos físicos. Así las técnicas computacionales pueden representar una herramienta valiosa para investigar los procesos con plasma, aunque el trabajo computacional es extremadamente desafiante, pues estos fenómenos son interdependientes y simultáneos. En este trabajo se propone un modelo computacional para simular una antorcha de plasma bidimensional de arco no trasferido en equilibrio termodinámico local. Se modelan condiciones de estado estacionario para las ecuaciones de conservación de mecánica de fluidos, transferencia de calor y electromagnetismo en el software Comsol Multiphysics® 5.1. En la transferencia de calor por radiación, el plasma se asume ópticamente fino y con un coeficiente de emisión neta. El flujo laminar de gas se modela con vórtice libre en la entrada para dos tipologías de antorchas axis-simétricas, respectivamente con argón y nitrógeno como gases de trabajo.

Keywords

Plasma; non-transferred arc torch; modelling; computational methods.

Abstract

Plasma torches are used in processing of materials and in energy industry for producing plasma, where direct currents arc torches represent the primary components of thermal plasma processes (plasma spraying, metal welding and cutting, waste treatment, biogas production, etc.). In a non-transferred arc plasma torch, an electric arc can be glowed by applying a direct current between the cathode and anode, both placed inside the torch. Then, the plasma is obtained by heating, ionizing and expanding a working gas, introduced into the chamber of the torch upstream of the cathode. Experimental works carried out by observation and measurements techniques are difficult to apply in this field, owing to the specific properties of these physical phenomena. Hence, computational techniques could represent a useful tool to investigate the plasma processing, although the computational work is extremely challenging, because the physical phenomena are not independent among them and simultaneous. In this work we provide a computational model for simulating a 2D non- transferred arc plasma torch, under hypothesis of local thermodynamic equilibrium. Steady state conditions are assumed for the equations of conservation of fluid mechanics, heat transfer and electromagnetics which are modeled by the Comsol Multiphysics® 5.1 software. The plasma is considered optically thin and a net emission coefficient is used for the heat transferred by radiation mechanisms. The gas flow is modeled as laminar with a free vortex at the inlet for two kinds of axisymmetric torches, one with argon and the second one with nitrogen as working gas, respectively.

Introducción

El plasma consiste de una mezcla de electrones, iones y partículas neutras. Las tecnologías de plasma recurren a la creación de un arco eléctrico a través de un gas que, por su resistividad eléctrica, genera altos valores de energía térmica permitiendo separar los electrones de sus átomos y moléculas y originando un gas ionizado o plasma. A temperaturas superiores a 2000 °C las moléculas del gas son disociadas en átomos y para valores mayores a 3000 °C, los átomos pierden electrones y llegan a estar ionizados [1]. El plasma térmico, es decir el gas ionizado donde las temperaturas de los electrones y de los iones son iguales, presenta altos valores de temperatura, emite radiación no ionizante y brinda una alta densidad de energía. Sus propiedades permiten que tenga múltiples aplicaciones en la industria (*plasma spraying*, soldadura, corte plasma, etc.), mientras que el actual aumento en las cantidades de desechos sólidos alrededor del mundo favorece la introducción de las tecnologías de plasma para su tratamiento industrial y posterior eliminación [2,3].

Los plasmas térmicos, tal como los utilizados en el tratamiento de residuos, pueden ser generados por muchos métodos incluyendo descargas eléctricas de corriente directa (DC) o de corriente alterna (CA), arcos transitorios (lámparas o arcos de pulso), descargas de radio frecuencia y microondas y los plasmas inducidos por láser. Los métodos de producción de plasma incluyen las antorchas de plasma DC como componentes principales del proceso [4]. En este caso las antorchas constituyen una parte esencial de los reactores de gasificación, donde el plasma es generado y confinado en una pequeña cavidad con geometría cilindro-cónica. Las tecnologías en uso prevén que se desarrollen descargas eléctricas de alta temperatura en el interior de la misma antorcha, entre un elemento central (cátodo) y la superficie interna de la pared de la antorcha (ánodo), como para las antorchas de arco no transferido [5]. Sucesivamente, en el arco eléctrico creado trasversalmente a la dirección del flujo del gas alimentado a la antorcha, se genera el plasma que luego se expande entre los mismos electrodos, adquiriendo la forma de un chorro de alta temperatura (*plasma jet*).

Las antorchas DC de plasmas de arco térmico se construyen con ánodos de cobre que deben ser refrigerados para aumentar su vida útil. El cátodo se fabrica con cobre en las antorchas de cátodo frío, mientras se utilizan cátodos de tungsteno con punta de torio en las antorchas de cátodo caliente. Dependiendo de la aplicación, pueden utilizarse distintos gases en la alimentación de la antorcha, como aire, argón, nitrógeno, dióxido de carbono e inclusive vapor de agua. En literatura (ver por ejemplo [6,7]) se pueden revisar otros aspectos sobre tipologías, materiales y características de las antorchas.

La modelación de una antorcha DC de plasma debe considerar muchos mecanismos, por la presencia de diferentes especies y diversos fenómenos físicos acoplados. Debido a la interacción entre los campos eléctrico, magnético, térmico y de velocidad, el régimen de flujo del plasma en la antorcha es altamente no lineal, con presencia de fuertes gradientes y efectos termodinámicos y químicos de no equilibrio. Trelles *et al.* [8] presentan los fundamentos de la modelación del arco del plasma y revisan los mecanismos principales. Bajo hipótesis de equilibrio termodinámico local (LTE), las temperaturas de los electrones y de las partículas pesadas son aproximadamente iguales y el plasma se puede modelar usando las ecuaciones de la magneto-hidrodinámica (MHD). La aproximación LTE no es válida cerca de las fronteras del plasma en la antorcha, donde el gas puede interactuar con paredes solidas frías o con corrientes de gas frío. Siendo que las propiedades del plasma dependen fuertemente de la temperatura, se puede originar una desviación importante respecto del comportamiento real del plasma, cuando la temperatura de los electrones se asume ser igual a la de las especies pesadas [8]. Por ejemplo, un aspecto peculiar está representado por la baja conductividad eléctrica σ del plasma para temperaturas T inferiores a un valor crítico (para gas argón $\sigma \leq 1$ S/m si $T < 4600$ K).

Consecuentemente, cerca de las paredes refrigeradas del ánodo de la antorcha, no se puede garantizar la descarga de corriente eléctrica usando modelos de LTE. Para superar esta dificultad, se han usado valores artificiales de σ en las regiones cercanas a las paredes del ánodo [8, 9], estimando la posición de la base del arco eléctrico sobre el ánodo y la forma misma del arco [9] y para la dinámica de la misma base en estudios transitorios [8]. Otra alternativa es considerar la aplicación del concepto de producción de entropía mínima para determinar la dimensión real del radio del arco y su longitud [10]. Para reducir la complejidad del trabajo de modelación, se han desarrollado modelos computacionales estacionarios en geometrías bi- y tri-dimensionales y también axis-simétricos bidimensionales, que en algunos casos pueden originar resultados no realísticos [9]. Usando un software comercial, Deng *et al.* [11] proponen un modelo MHD para simular el campo electromagnético, la transferencia de calor y el flujo del plasma en una antorcha DC, bajo condiciones de régimen laminar y turbulento. El sitio de la base del arco se computa automáticamente, siendo igual a la posición del valor máximo de la densidad de corriente en la superficie interior del ánodo. Finalmente, Mendoza *et al.* [12] modelan un plasma térmico de tipo DC en un dominio tri-dimensionales y calculan el sitio de la base del arco.

En las secciones sucesivas del artículo se describe el trabajo de modelación, que tiene la siguiente estructura: la descripción del modelo físico y matemático se brinda en el párrafo 2; en la sección 3 se reporta el modelo computacional desarrollado con el software Comsol Multiphysics®; seguidamente en la sección 4 se analizan los resultados numéricos obtenidos y en el párrafo 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

Modelación físico-matemática de la antorcha de corriente directa

Modelo físico: dimensiones de la antorcha y materiales

Con el propósito de poder comparar nuestros resultados con datos de la literatura científica, se seleccionan dos tipologías de antorchas, la *antorcha 1* estudiada computacionalmente por He-Ping Li *et al.* (He-Ping Li *et al.* [9], He-Ping Li and Xi Chen [13]) y la *antorcha 2* usada por Mazingo en su actividad experimental [14]. Usando condiciones de axis-simetría, ambas antorchas DC de plasma se pueden modelar como una región bidimensional [15]. En las figuras 1 y 2 se brindan respectivamente las dimensiones de las *antorcha 1* y *2*, con el sistema de coordenadas cilíndricas r, z , usado para la modelación del plasma. Los gases de trabajo son argón para la *antorcha 1* y nitrógeno para la *antorcha 2*, mientras el material del ánodo y del cátodo es cobre para ambas antorchas. Todas las propiedades físicas de los materiales se obtienen de la base de datos de Comsol Multiphysics® 5.1. En el modelo se consideran condiciones de equilibrio termodinámico local (LTE), luego las temperaturas de los electrones y de las partículas pesadas son iguales. En este caso un aspecto peculiar es la baja conductividad eléctrica σ para temperaturas T por debajo de un valor crítico: para gas argón $\sigma \leq 1$ S/m si $T < 4600$ K, mientras que para gas nitrógeno $\sigma \leq 1$ S/m si $T < 5300$ K, aproximadamente. Para asegurar el flujo eléctrico se usa un valor artificial mínimo de 8000 S/m (σ_{min}) para las conductividades eléctricas de los gases argón y nitrógeno. Debido al régimen estacionario, la dinámica del arco sobre la superficie del ánodo no se modela. Para los fenómenos de radiación térmica el plasma se considera ópticamente fino, usando un coeficiente de emisión térmica neto. Además, se asume un flujo gaseoso laminar y débilmente compresible, válido para un número de Mach menor a 0.3. Con el propósito de definir condiciones de flujo rotacional en la entrada de la antorchas, se modelan regímenes de vórtices libre, siendo la velocidad azimutal v_θ inversamente proporcional a r .

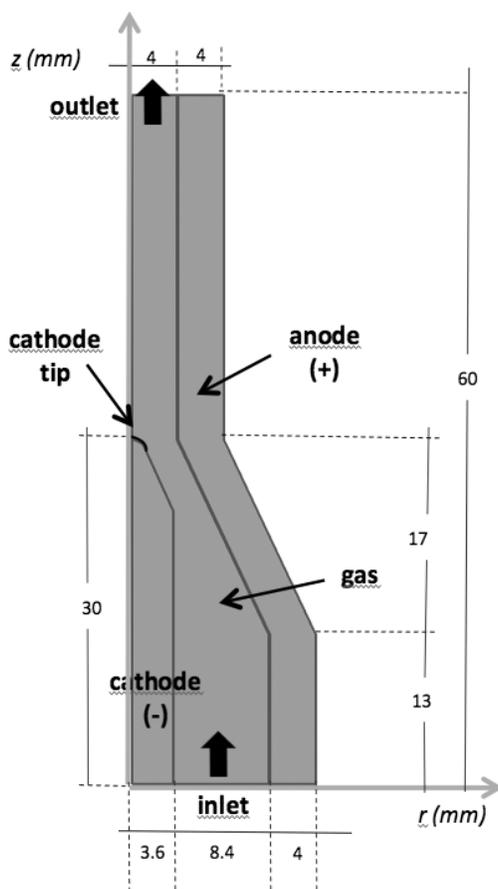


Figura 1. Geometría 2D de la antorcha 1 de He-Ping Li *et al.* [9].

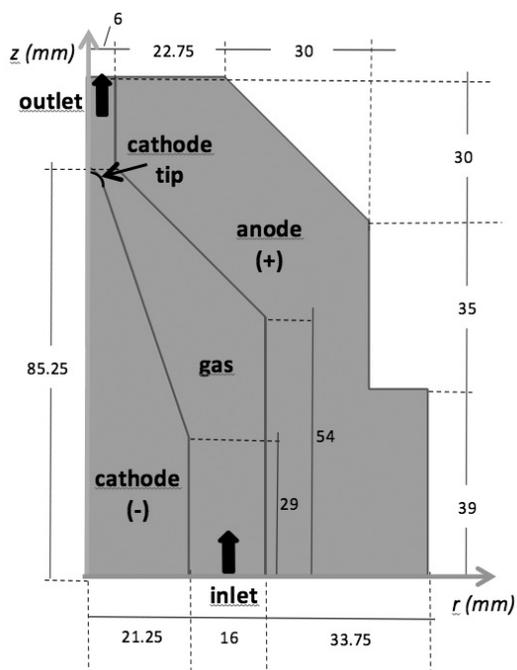


Figura 2. Geometría 2D de la antorcha 2 de Mozingo [14].

Modelo matemático: ecuaciones diferenciales de conservación

En condiciones de flujo laminar y débilmente compresible del gas de la antorcha, las ecuaciones diferenciales en estado estacionario de continuidad y de conservación del momentum de Navier-Stokes en notación tensorial, son las siguientes [16]:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2\eta}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \mathbf{F} \quad (2.2)$$

donde las magnitudes ρ , η y \mathbf{u} son respectivamente la densidad, la viscosidad dinámica y la velocidad del fluido, p la presión, \mathbf{I} el tensor identidad y \mathbf{F} las fuerzas de cuerpo, incluyendo la fuerza de Lorentz \mathbf{F}_L . Por otro lado la conservación de la energía térmica en la antorcha se describe mediante la siguiente ecuación de Fourier que incluye las magnitudes de transporte convectivo y los términos fuente [17]:

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2.3)$$

donde T representa la temperatura, siendo k , C_p y Q respectivamente la conductividad térmica, el calor específico a presión constante y los términos fuentes. La magnitud Q modela el calentamiento Joule Q_j , la pérdida volumétrica neta de energía por radiación (definida mediante el coeficiente de emisión neta) y el transporte de entalpia. Para los fenómenos electromagnéticos estacionarios en la antorcha de plasma, se introduce el potencial magnético vectorial \mathbf{A} y el potencial eléctrico escalar V , mediante las ecuaciones:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.5)$$

con \mathbf{B} que representa la densidad de flujo magnético y \mathbf{E} la intensidad de campo eléctrico. Consecuentemente, las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.9)$$

y la conservación de la carga:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.10)$$

se formulan en términos de estos potenciales [18]. En estas relaciones, la cantidad

$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ describe la densidad de corriente, $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}$ representa la intensidad del campo magnético y $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ la densidad del flujo eléctrico. Nuevamente \mathbf{u} es el campo de velocidad del medio electromagnético, mientras que las propiedades σ , μ y ε son respectivamente la conductividad eléctrica, la permeabilidad magnética y la permisividad eléctrica del medio. Adicionalmente, para completar el acople del modelo termo-fluido-electromagnético de la antorcha de plasma, las magnitudes \mathbf{F}_L y Q_j se expresan en términos de las variables electromagnéticas \mathbf{J} , \mathbf{E} y \mathbf{B} , usando las definiciones siguientes:

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.11)$$

$$Q_j = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.12)$$

Las ecuaciones 2.1 hasta 2.12 constituyen el sistema de ecuaciones diferenciales del modelo de la antorcha de plasma de arco térmico no transferido, para las cuales deben definirse las condiciones de borde, con el propósito de obtener la solución numérica. Las condiciones de borde implementadas se presentan en la próxima sección, conjuntamente con la descripción del modelo computacional desarrollado con el software COMSOL Multiphysics® 5.1.

Modelo computacional en Comsol Multiphysics®

En esta sección se describe el trabajo de modelación realizado con COMSOL Multiphysics® 5.1, un software comercial que emplea el método de elementos finitos para calcular numéricamente la solución de las ecuaciones diferenciales con derivadas parciales, obtenidas modelando los diversos procesos físicos de la antorcha. El modelo axis-simétrico de la antorcha de plasma con corriente directa se implementa en el software usando las librerías de las físicas de los módulos CFD [16], Heat Transfer [17], AC/DC [18] y Plasma [19], este último para los fenómenos del acoplamiento del flujo multifísico de la antorcha de plasma.

Condiciones de frontera implementadas

Para las condiciones de frontera de la ecuación diferencial de Fourier de la conservación de la energía térmica, se asumen en la antorcha: una temperatura de 300 K en la entrada; un ánodo enfriado externamente (con un coeficiente de transferencia h igual a 10^4 W/(m² K) y una temperatura externa T_{ext} de 500 K) e internamente una transferencia de energía por radiación de cuerpo gris; una temperatura de 3500 K (emisión termoiónica) en la punta del cátodo; transferencia de calor por radiación sobre las paredes del cátodo considerado como cuerpo gris; aislamiento térmico en las otras superficies de la antorcha mediante la ecuación $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$, donde \mathbf{q} representa el flujo de calor y \mathbf{n} la dirección normal a la superficie.

Para la evolución del campo de velocidad de las ecuaciones de Navier-Stokes, se fija en la entrada de la antorcha un flujo volumétrico G de argón de 2.0 STP m³/h para la *antorcha 1* de He-Ping Li [9, 13], dando una velocidad axial v_z de 1.35 m/s. Definiendo la velocidad azimutal v_θ del vórtice libre como $v_\theta = k_r/r$, se consideran los siguientes tres valores de k_r : $4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s, $9.72 \times 10^{(-3)}$ m²/s y $14.58 \times 10^{(-3)}$ m²/s. Para la *antorcha 2* de Mazingo [14], se asume en la entrada un flujo másico de nitrógeno igual a 2.17 g/s, equivalente aproximadamente a 6.35 STP m³/h y a una velocidad axial de 1.37 m/s. Nuevamente se modelan tres condiciones de flujo con vórtice en la entrada, con k_r igual a $0.291 \times 10^{(-1)}$ m²/s, $0.582 \times 10^{(-1)}$ m²/s y $0.873 \times 10^{(-1)}$ m²/s, respectivamente. Para las dos antorchas DC se fija una velocidad radial v_r nula en la entrada. Finalmente, las otras condiciones de borde usuales son la de no deslizamiento en las paredes y presión nula en la salida de la antorcha de plasma.

Por otro lado, para resolver las ecuaciones de Maxwell en términos de los campos potencial eléctrico escalar V y potencial magnético vectorial \mathbf{A} , se implementan los siguientes valores en las fronteras de la antorcha de plasma DC: en la punta redondeada del cátodo una densidad de corriente J_n con valores en el rango $10^7 \div 10^8$ A/m², equivalente a una intensidad de corriente I de $43.36 \div 433.6$ A para la *antorcha 1*; una densidad de corriente en el rango de $10^6 \div 10^7$ A/m², que significa una intensidad de corriente I de $50.38 \div 503.8$ A para la *antorcha 2*; la condición $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ de aislamiento eléctrico sobre las restantes superficies del cátodo, en la entrada y en la salida de la antorcha; condición de potencial eléctrico nulo en la superficie interior del

ánodo; aislamiento magnético en todas las fronteras, con el potencial magnético \mathbf{A} que satisface la condición $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$. Adicionalmente, se usa la condición *gauge fixing* $Y_0 = 1$ A/m para el computo del potencial magnético vectorial \mathbf{A} .

En último, en todas las ecuaciones del modelo computacional se usa la condición de simetría axial con respecto al eje z de la antorcha de plasma.

Resolución numérica de las ecuaciones del modelo

El sistema de ecuaciones diferenciales con derivadas parciales del modelo computacional se resuelve numéricamente en Comsol Multiphysics® 5.1, dividiendo la región bi-dimensional de la antorcha en tres dominios, cátodo, fluido (plasma) y ánodo. En el modelo los campos eléctrico y magnético se calculan en el fluido y en el ánodo, el flujo del fluido se simula solamente en la región del plasma, mientras que el transporte de energía térmica se implementan en todas las regiones. El dominio computacional se crea con un mallado que usa un poco más que 10^5 elementos triangulares para ambas antorchas, refinando la malla en las regiones del plasma y en proximidad de las paredes de los electrodos, lo cual resulta en un número de grados de libertad mayor que 10^6 . Debido a que los fenómenos que gobiernan el plasma son altamente no lineales y simultáneos, se selecciona un método de resolución numérica completamente acoplado. Se usa el solucionador numérico directo MUMPS para la integración de las ecuaciones diferenciales y se implementa un estudio de barrido paramétrico del término de fuente de calor para mejorar y garantizar la convergencia de los cálculos. Para las diferentes corridas, el tiempo de solución es en media de 34600 s.

Resultados computacionales de las antorchas de corriente directa

Para la *antorcha 1*, usando un valor mínimo σ_{min} of 8000 S/m en la región de argón, una intensidad de corriente de 0.8×10^8 A/m² en la punta del cátodo y un flujo de vórtice libre en la entrada con $k_f = 4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s, las figuras 3 y 4 muestran los campos de temperatura y velocidad, respectivamente. Estos campos se brindan en figuras 5 y 6 para la *antorcha 2*, con el mismo valor de σ_{min} en la región de nitrógeno, $k_f = 0.291 \times 10^{(-1)}$ m²/s y $J_n = 0.7 \times 10^7$ A/m². En el caso la *antorcha 1*, la posición de la base del arco predicha por He-Ping y Xi Chen [13], es cerca de la intersección de la parte convergente y la parte cilíndrica del ánodo ($z=30$ mm) y no es uniforme en la dirección circunferencial. La misma posición se obtiene en las simulaciones computacionales del este trabajo, como evidencian los gráficos de figura 7 para la *antorcha 1* ($z=30$ mm) y de figura 8 para la *antorcha 2*, donde se brinda la densidad de corriente normal a la pared del ánodo. En estas figuras, la densidad de corriente máxima corresponde a la base del arco en la pared interior del ánodo, que para ambas antorchas se computa exactamente en la intersección entre la sección cónica y la sección cilíndrica superior ($z=30$ mm para la *antorcha 1* y $z=85.25$ mm para la *antorcha 2*). Sucesivamente se llevan a cabo nuevas simulaciones con el propósito de evaluar la variación del sitio de la base del arco en la pared del ánodo. En este caso se implementa un valor artificial σ_{min} solamente en una región estrecha entre el cátodo y el ánodo, pudiéndose así investigar la influencia de conductividad eléctrica del gas sobre los resultados computacionales. He-Ping Li *et al.* [9] aplican el principio de Steenbeck y calculan la base del arco a una distancia de $z=36$ mm para la misma *antorcha 1*, usando una corriente de 400 A y un flujo volumétrico de gas argón 2.0 STP m³/h. De acuerdo a estos resultados, se modela una área estrecha de plasma en correspondencia de $z=36$ mm, entre la región central de la antorcha y la pared del ánodo, con la condición de $\sigma_{min} = 8000$ S/m. Lo anterior equivale a fijar la posición de la base del arco, como confirma el valor de la densidad de corriente del gráfico de figura 9. En la simulación, la densidad de corriente normal en la pared interior del ánodo de la *antorcha 1* ha sido evaluada para $G = 2.0$ STP m³/h, $k_f = 4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s y $J_n = 0.4 \times 10^8$ A/m² ($I=173.4$ A).

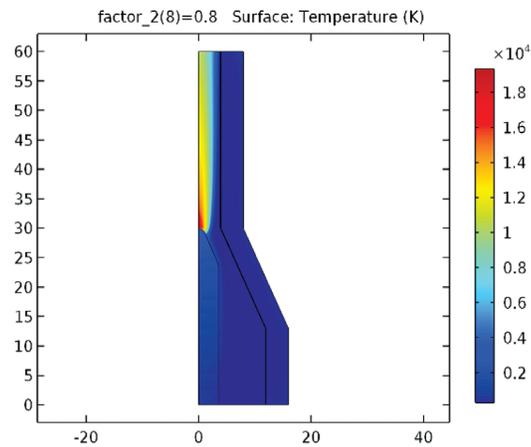


Figura 3. Campo de temperatura de la *antorcha 1* ($G = 2.0$ STP m³/h, $k_t = 4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s, $J_n = 0.8 \times 10^8$ A/m²).

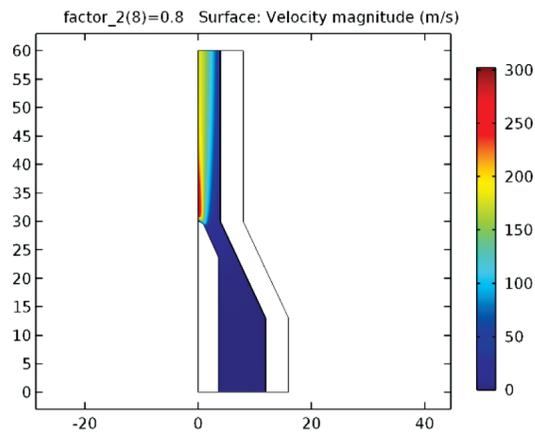


Figura 4. Campo de velocidad de la *antorcha 1* ($G = 2.0$ STP m³/h, $k_t = 4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s, 0.8×10^8 A/m²).

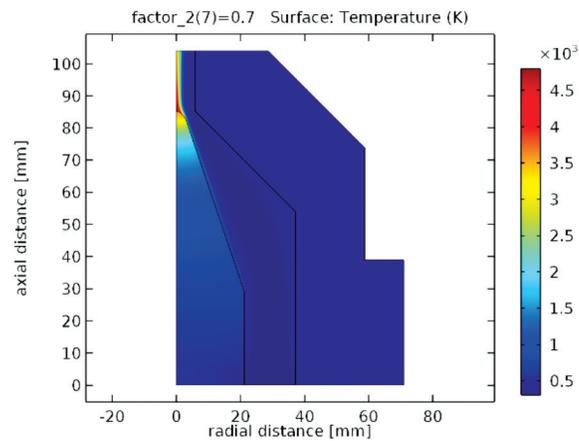


Figura 5. Campo de temperatura de la *antorcha 2* ($G = 6.35$ STP m³/h, $k_t = 0.291 \times 10^{(-1)}$ m²/s, $J_n = 0.7 \times 10^7$ A/m²).

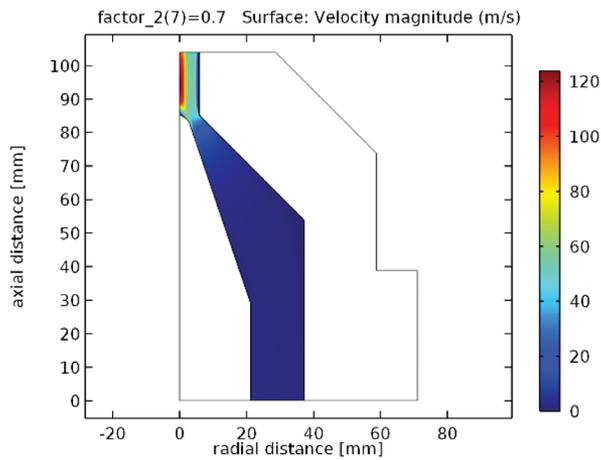


Figura 6. Campo de velocidad de la *antorcha 2* ($G = 6.35$ STP m^3/h , $k_1 = 0.291 \times 10^{-1}$ m^2/s , $J_n = 0.7 \times 10^7$ A/m^2).

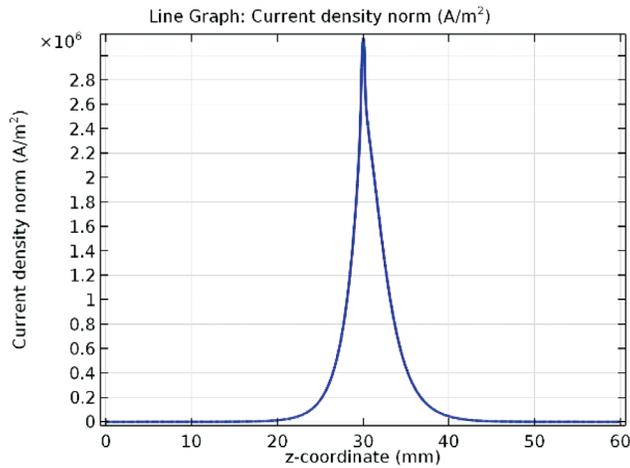


Figura 7. Densidad de corriente normal en la pared interior del ánodo de la *antorcha 1* ($G = 2.0$ STP m^3/h , $k_1 = 4.86 \times 10^{-3}$ m^2/s , $J_n = 0.8 \times 10^8$ A/m^2).

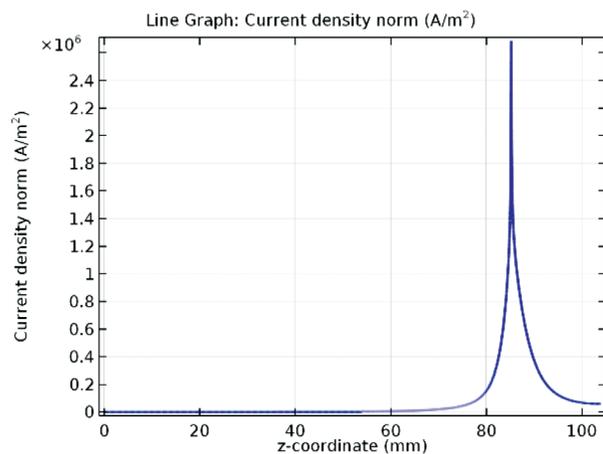


Figura 8. Densidad de corriente normal en la pared interior del ánodo de la *antorcha 2* ($G = 6.35$ STP m^3/h , $k_1 = 0.291 \times 10^{-1}$ m^2/s , $J_n = 0.7 \times 10^7$ A/m^2).

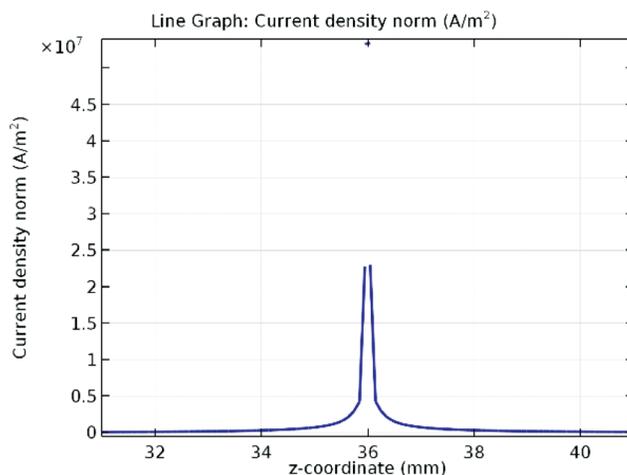


Figura 9. Densidad de corriente normal en la pared interior del ánodo de la *antorcha 1*, variando la posición de la base del arco ($G = 2.0$ STP m³/h, $k_1 = 4.86 \times 10^{-3}$ m²/s, $J_n = 0.4 \times 10^8$ A/m²).

Los nuevos campos de temperatura y velocidad de la *antorcha 1* se presentan respectivamente en las figuras 10 y 11. Se observa que, hasta usando un valor más pequeño de densidad de corriente en la punta del cátodo, se obtiene la misma magnitud de temperatura máxima del caso anterior de la figura 3 y sobre todo un valor doble de velocidad comparando con la figura 4.

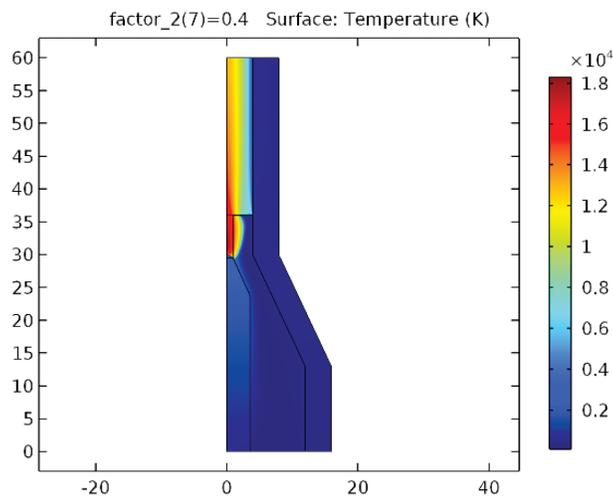


Figura 10. Campo de temperatura de la *antorcha 1*, variando la posición de la base del arco ($G = 2.0$ STP m³/h, $k_1 = 4.86 \times 10^{-3}$ m²/s, $J_n = 0.4 \times 10^8$ A/m²).

Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo computacional de una antorcha de plasma DC de arco térmico no transferido y han sido simuladas dos tipologías de antorchas, en particular:

- el modelo es estacionario, axis-simétrico, bi-dimensional e incorpora el flujo laminar débilmente compresible del plasma, los mecanismos de transporte de la energía térmica y los campos electromagnéticos presentes en la antorcha;

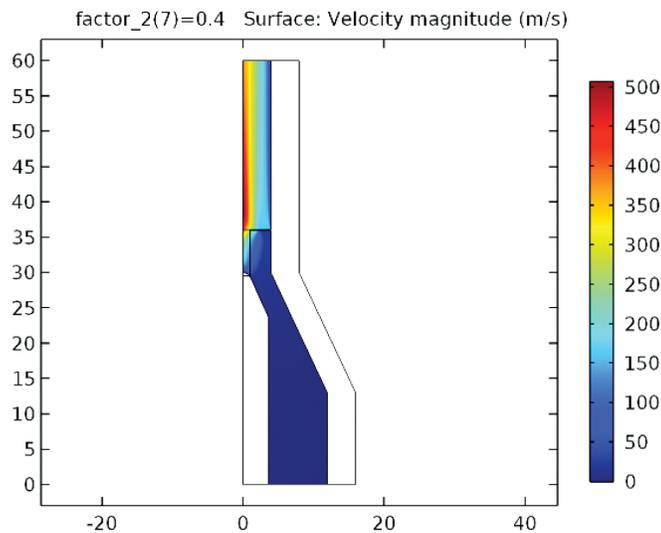


Figura 11. Campo de velocidad de la *antorcha 1*, variando la posición de la base del arco ($G = 2.0$ STP m³/h, $k_f = 4.86 \times 10^{(-3)}$ m²/s, 0.4×10^8 A/m²).

- para resolver las ecuaciones diferenciales de las corrientes eléctricas y del campo magnético en la región del plasma y en el ánodo, se han adoptado condiciones de frontera específicas y se ha seleccionado la estrategia numérica de resolución;
- han sido modeladas y calculadas las fuerzas de Lorentz y los efectos del calentamiento Joule, que acoplan distintos fenómenos físicos de la antorcha;
- para evaluar el efecto de la posición de la base del arco en la pared del ánodo, han sido simulados nuevos casos y determinados los nuevos campos de velocidad y térmicos, variando justamente la posición de la base;
- los resultados numéricos de la temperatura del plasma, su velocidad y de la posición de la base del arco son bastante satisfactorios y se comparan con los de otros autores.

Agradecimientos

Se agradece la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por la colaboración brindada en el marco del proyecto *I- PLARE TORCH: Diseño y simulación de una antorcha de plasma térmico de arco no transferido para el tratamiento de residuos*, código 5401-1490-2001.

Referencias

- [1] M. I. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender, *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, Plenum Press, New York, 1994.
- [2] P. Colombo, G. Brustain, E. Bernardo and G. Scarinci, "Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products", *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 7, 225–239, 2003.
- [3] Y. M. Kuo, T. C. Lin and P. J. Tsai, "Immobilization and encapsulation during vitrification of incineration ashes in a coke bed furnace", *Journal of Hazardous Materials*, 133, 75–78, 2006.
- [4] A. Gleizes, J.J. Gonzalez and P. Freton, "Thermal plasma modelling", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, R153–R183, 2005.
- [5] J. Herbelein and A. B. Murphy, "Thermal plasma waste treatment", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41, 2008.

- [6] E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise and A.R. Boccaccini, "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review", *Journal of Hazardous Materials*, 161, 614-626, 2008.
- [7] **S. Y. Mashayak**, "CFD modeling of plasma thermal reactor for waste treatment," MSc. Thesis, Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2009.
- [8] J.P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle, and J.V.R. Heberlein, "Arc plasma torch modeling", *Journal of Thermal Spray Technology*, 18, No. 5/6, 728-752, 2009.
- [9] He-Ping Li, E. Pfender and Xi Chen, "Application of Steenbeck's minimum principle for three dimensional modelling of DC arc plasma torches", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 1084-1096, 2003.
- [10] B. Selvan, K. Ramachandran, K.P. Sreekumar, T.K. Thiyagarajan and P.V. Ananthapadmanabhan, "Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch", *Vacuum*, 84, 442-452, 2010.
- [11] Deng Jing, Li Yahojian, Xu Yongxiang and Sheng Hongzhi, "Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a DC non-transferred arc plasma torch operating under laminar and turbulent conditions", *Plasma Science and Technology*, 13, vol. 2, 201-207, 2011.
- [12] N.Y. Mendoza Gonzalez, L. Rao, P. Carabin, A. Kaldas and J.L. Meunier, "A three-dimensional model of a DC thermal plasma torch for waste treatment applications", *International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-19*, July 27-31, Bochum, Germany, 2009.
- [13] He-Ping Li and Xi Chen, "Three-dimensional modelling of a dc non-transferred arc plasma torch", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, L99-L102, 2001.
- [14] J.A. Mazingo, "Evaluation of a strut-plasma torch combination as a supersonic igniter-flameholder", MSc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2004.
- [15] B. Chiné, M. Mata, I. Vargas, "Modeling a DC plasma with Comsol Multiphysics", *Comsol Conference 2015*, October 14-16, Grenoble, France, 2015.
- [16] Comsol AB, Comsol Multiphysics-CFD Module, User's Guide, Version 5.1, 2015.
- [17] Comsol AB, Comsol Multiphysics-Heat Transfer Module, User's Guide, Version 5.1, 2015.
- [18] Comsol AB, Comsol Multiphysics-AC/DC Module, User's Guide, Version 5.1, 2015.
- [19] Comsol AB, Comsol Multiphysics-Plasma Module, User's Guide, Version 5.1, 2015.
- [20] B. Chiné, "A 2D model of a DC plasma torch", *Comsol Conference 2016*, October 12-14, Munich, Germany, 2016.
- [21] A. H. Dilawari, J. Szekely and R. Westhoff, "An assessment of the heat and fluid flow phenomena inside plasma torches in non-transferred arc systems", *ISIJ International*, 30, 381-389, 1990.
- [22] C.L. Felipini and M.M. Pimenta, "Some numerical simulation results of swirling flow in d.c. plasma torch", *15th Latin American Workshop on Plasma Physics, Journal of Physics: Conferences Series*, 591, 01238, 2015.

Potencia Reactiva: Despacho Óptimo con una programación lineal-PARTE A

Reactive Power: Optimal Dispatch with linear programming-PART A

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2017
Fecha de aprobación: 26 de julio de 2018

Gómez-Ramírez, G. Potencia Reactiva: Despacho Óptimo con una programación lineal-PARTE A. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 25-38.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4116>



¹ Profesor, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@tec.ac.cr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

Palabras clave

Potencia reactiva; despacho económico; programación lineal.

Resumen

La toma de decisiones se basa en aspectos técnicos, legales, pero sobretodo económico, no obstante, se requiere de gran experiencia del negocio para de esta manera ser acertado y tratar de no impactar negativamente. En el siguiente trabajo de investigación parte A, plantea un despacho óptimo de potencia reactiva a partir de la utilización de una optimización por programación lineal; dicha potencia es de gran importancia en los Sistemas Eléctricos de Potencia para el control y regulación de los perfiles de tensión. De igual forma contribuye en el flujo de potencia real de las líneas de transmisión. Por otro lado, es importante señalar, que los sistemas eléctricos a nivel mundial, no cuantifican su uso ni establecen valores para su cobro, por lo que el aporte de esta investigación va más allá de utilizar una herramienta de fácil uso, sino de proponer estructuras tarifarias donde se incluyan costos por el uso de la potencia reactiva y de esta manera disminuir los precios de la electricidad. Por último, en el presente trabajo se desarrolla en un sistema de potencia tipo IEEE-14.

Keywords

Reactive power; economic dispatch; linear programming.

Abstract

The decision-making is based on technical, legal, but especially economic facts; it requires business experience in order to be successful and try to have the smallest impact as possible. In the following research *part-A*, it proposes an optimal dispatch of reactive power and to use linear programming. This power is relevant in the Electrical Power Systems for the voltage's control and regulation, and it contributes to the real power flow too. On the other hand, it is important to point out that the world's power systems do not quantify their use nor establish prices; this research uses an easy tool, recommends a new rate's structures and in the future can be a way to reduce it. Finally, this work develops an IEEE-14 power system.

Introducción

Los primeros sistemas eléctricos de potencia fueron desarrollados alrededor del año 1900, muchos de ellos, por su naturaleza tienen carácter público, semiprivado y privado, ya que por razones económicas muchas veces los gobiernos no asumieron la responsabilidad de la electrificación de los países. Hoy día la cadena de valor está integrada por la Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización de electricidad. Gran parte de los servicios privados son la generación y la distribución, no obstante, la transmisión por lo general es un monopolio natural del estado debido a la alta inversión que esta implica.

La importancia de establecer mecanismos para las tarifas por el servicio, uso de la electricidad y ante todo definir de las estructuras de los costos para cada una de las componentes del sistema eléctrico, corresponden esencialmente a las áreas financieras y de comercialización de las empresas. En algunos casos se han establecido mercados eléctricos para ofrecer una gama de posibilidades de diferentes servicios en cuanto a la oferta y demanda definidos por el mercado.

Estado actual de la cuestión del despacho de potencia reactiva

Hsu y Chen en 2000 [1], cuestionan si dentro del esquema de la prestación del servicio eléctrico queda claro la responsabilidad de la compensación de potencia reactiva, quienes deben asumir los costos, si los consumidores finales deben pagar los costos de la potencia reactiva, o por el contrario las empresas generadoras de electricidad deben asumir este rol?. Por último, se hace un análisis de casos de sistemas eléctricos sin compensación de la potencia reactiva, con sistemas compensados parcial y completamente en los nodos de interconexión valorando la mejor opción para el sistema propuesto.

Miller en 2001 [2], plantea los métodos para la asignación de los peajes en los sistemas de transmisión eléctrica de acuerdo con su uso. En esta referencia se repasan todos los sistemas de las tarifas y se propone un método de cálculo para tarifas eléctricas. Doña y Paredes [3] proponen una estructura en los precios en mercados competitivos usando para el cálculo las pérdidas de transmisión. Se basa en la teoría de los costos marginales y las otras técnicas de optimización.

Tovar et ál. en 2002 [4] proponen una metodología basada en la sensibilidad para asignar los costos de los servicios del control de tensión y la potencia reactiva en los mercados eléctricos desregulados, en ella se distribuyen los costos de la potencia reactiva y estos servicios se distribuyen con base a sensibilidades relativas relacionadas con la tensión de los nodos de la carga y la generación. Tequitlapa [5] plantea una asignación de cargos por servicios del control de tensión y las reservas reactivas para el mercado de energía. Se plantean las posibles metodologías para los análisis de costos, realiza un análisis económico de la situación y por último una metodología de análisis para la asignación de los cargos. Zhong y Bhattacharya [6] plantean una administración de la potencia reactiva en los mercados eléctricos desregulados, en ella se hace una revisión de los distintos hitos históricos acontecidos en la última década del estudio en cuestión. Se mencionan los problemas tanto de la regulación de la tensión como de la frecuencia, se exponen algunos mecanismos para las propuestas de compensación financiera dentro de los parámetros regulatorios de cada país. Laguna [7] asigna los cargos por porteo de potencia real y la reactiva en los sistemas de transmisión, en la cual se analiza el método del rastreo de la potencia reactiva y establece una asignación de los costos a través de varios modelos aplicándolo a varios mercados internacionales.

Cortez en 2003 [8] plantea un análisis para establecer los precios para la potencia reactiva en los mercados descentralizados y competitivos. En ella se estudia la problemática del cobro de las tarifas en Chile y hace un recorrido por diversos mercados mundiales para estudiar la problemática. Macías y Pérez [9] analizan la regulación de las tarifas y la liberación del sector eléctrico español. Propone algunas alternativas de regulación de las tarifas para el transporte de la energía. Dan una perspectiva del impacto de la regulación en el mercado español.

Barragán y Robles en 2006 [10] propone el costo por el soporte de la tensión de los generadores en los sistemas eléctricos con el despacho centralizado y en él se plantean soluciones para establecer costos variables para el soporte de la tensión, de esta manera se obtiene una curva de capacidad y el costo de oportunidad por colocar la potencia. Se hace la evaluación en un sistema eléctrico de 30 nodos.

Carbajo en 2007 [11] analiza el mercado español y explora los servicios de ajuste dentro del sistema eléctrico, e incluye los servicios complementarios, la regulación primaria, secundaria y terciaria, así como las implicaciones en la tensión de la red eléctrica. Oh y Thomas [12] establecen los precios de la potencia reactiva en los mercados eléctricos desregulados proponiendo nuevas oportunidades de explotación de los mercados eléctricos tanto para la venta de la potencia activa como la reactiva. Lo analiza a través de la teoría de juegos.

Valenzuela en 2008 [13] estudia los efectos económicos que conllevan la prestación de los servicios auxiliares y se analizan los diversos escenarios en diferentes mercados mundiales, así como las propuestas de bajo costo dentro de los mercados eléctricos. Adicionalmente se desarrolla el problema del control de la tensión y establece una relación para con los mercados eléctricos.

Rabiee et ál. en 2009 [14] analizan el valor de la potencia reactiva en un sistema de potencia, indican que esta no es analizada en las ecuaciones financieras. No obstante, establecen la correlación entre las potencias activas y la reactiva, por ello, se establece la necesidad que ambos rubros sean considerados en el precio.

Abinaya et ál. en 2014 [15] realiza un análisis de los costos de la potencia reactiva a partir del uso de la teoría de los costos marginales en mercados eléctricos, se explica la importancia de la potencia reactiva pues este tipo de potencia es necesario para el trasiego de potencia activa y mantener la seguridad operativa del SEP. Se hace un análisis a un sistema IEEE-14 y se propone un flujo de potencia a partir de un despacho óptimo de potencia reactiva.

Kumar y Kumar en 2015 [16] proponen la tarifa de la potencia reactiva en sistemas eléctricos de los mercados eléctricos abiertos, en este se cuantifica la potencia reactiva a partir de la curva de la capacidad del generador. Se plantean las funciones de costos marginales y se hace un desarrollo computacional a partir de una red de distribución de prueba IEEE-24 para minimizar el costo de la potencia reactiva. Los resultados son validados con otros métodos de estimación de costos, por último, se hace un análisis de los costos para potencia activa.

Teoría

Componentes de un Sistema Eléctrico

Un sistema eléctrico de potencia tiene varias componentes que constituyen las partes principales del mismo. Entre ellos están: *Generación, Transmisión y Distribución*. Cada una de ellas, serán parte vital a fin de garantizar el suministro eléctrico de los clientes y los usuarios de la electricidad. En la figura 1 se muestra un esquema de un sistema eléctrico.

La generación de electricidad puede darse por métodos convencionales y no convencionales, los primeros son de una manera clásica como la hidráulica, geotérmica y térmica. No obstante, debido al desarrollo de nuevas tecnologías hoy día se recurre a formas no convencionales como la energía eólica y solar, están van tomando un auge importante y su penetración hoy día es objeto de estudios en los sistemas eléctricos de potencia. La transmisión requiere de las líneas para el “transporte” de la energía a los centros de consumo y es llevada a las subestaciones donde se transforma en niveles permisibles y seguros para las personas y equipos.

Por esta razón variables como la tensión y la frecuencia son importantes en la regulación. Ambos elementos operan simultáneamente con la variable de tensión eléctrica y son fundamentales en la calidad del servicio prestado por las compañías eléctricas a los clientes de los servicios eléctricos. Por ejemplo, en Costa Rica se permite una variación de la tensión de $\pm 5\%$ y con respecto a la frecuencia eléctrica no puede variar en $\pm 0.5\%$ de acuerdo con lo establecido por el regulador de servicios públicos. [18].

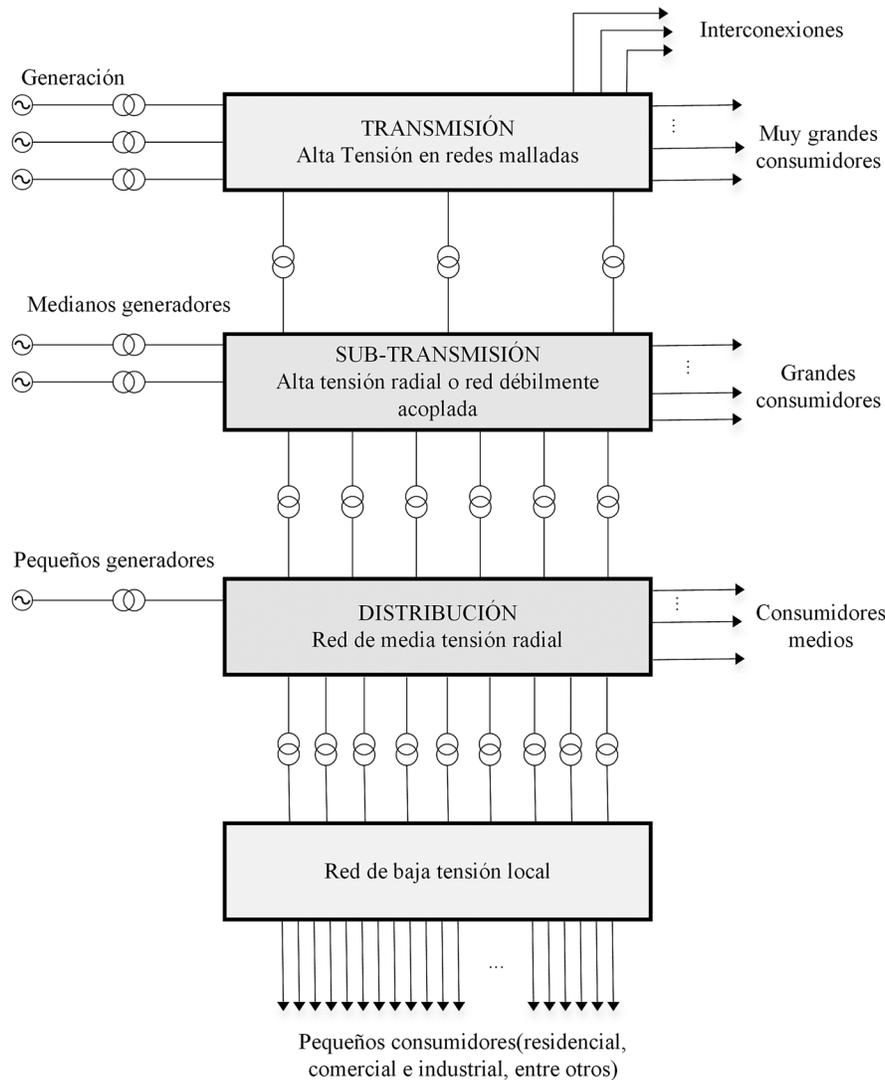


Figura 1. Esquema básico de Sistema Eléctrico de Potencia basado en Eremia y Shahidehpour [17]

Calculo del Flujo de Potencia entre líneas y otros elementos

El cálculo y análisis del flujo de potencias en la red eléctrica es uno de los aspectos más importantes de su comportamiento en régimen permanente pues consiste en determinar los flujos de potencia activa y reactiva en cada línea eléctrica del sistema y las tensiones en cada una de las barras. Existen distintos métodos para el cálculo del flujo de potencias, entre los que se pueden mencionar: Gauss, Newton-Raphson y Gauss-Seidel. [19] [20] El presente artículo se desarrolló por el método de Gauss Seidel.

Cálculo de Costos por Potencia Reactiva para bancos de capacitores y generadores sincrónicos

Para el caso del banco de capacitores, se propone la *ecuación 1* para el cálculo de la potencia reactiva:

$$C_C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{mc} * t_u * Cap_{MVA}r}{t_{vu} * 8760} + C_{mto} \right)_i \quad [\$] \quad (ec.1)$$

donde

C_{ic} = Costo por entrega de potencia por medio de banco de capacitores (\$/periodo)

C_{mc} = Costo total del módulo de banco de capacitores (\$/periodo)

t_u = tiempo de uso del banco de capacitores (Horas/periodo)

Cap_{MVA_r} = capacidad del banco de capacitores (MVA_r)

t_{vu} = tiempo de vida útil del banco de capacitores (años)

8760: horas del año

C_{mto} : costo del mantenimiento (\$/periodo)

i = número de barras del SEP

La principal limitante del banco de capacitores es que entregará toda la potencia para la cual está diseñado y este no tiene la capacidad de regulación de la potencia reactiva que inyecta al sistema eléctrico.

Cálculo del costo para compensador síncrono

Para el caso del compensador síncrono, se propone la *ecuación 2* para calcular el costo para potencia reactiva despachada:

$$C_S = \sum_{i=1}^n (C_E * t_u * Q_{prod} + Q_{gen} * C_{MVA_r} + C_{mto})_i + (C_{pt} * Q_{gen})_m \quad [\$] \quad (ec.2)$$

donde

C_{im} = Costo por producir Potencia Reactiva (\$/periodo)

C_E = Costo de Potencia Reactiva por hora (\$/KVA_rH)

C_{MVA_r} = Costo Potencia (\$/KVA_r)

t_u = Tiempo de utilización (Horas/periodo)

Q_{prod} = Potencia Reactiva en función del tiempo entregada a la red (MVA_r-H)

Q_{gen} = Potencia Reactiva entregada a la red (MVA_r/periodo)

C_{mto} : Costo del mantenimiento del periodo (\$/periodo)

C_{pt} : Costo del peaje de transmisión (\$/KVA_r)

m =cantidad de líneas de transmisión del SEP

Los costos totales de la potencia reactiva debido a la inyección por los bancos de capacitores y el compensador síncrono deben ser calculados en la siguiente ecuación de costos en cada uno de los nodos del sistema eléctrico:

$$C_T = C_C + C_S \quad [\$]$$

donde

C_T : costos totales de potencia reactiva inyectada

C_C : costos de potencia reactiva por bancos de capacitores

C_S : costos de potencia reactiva por compensador síncrono

Ecuación de Optimización para establecer Función Objetivo

Una vez establecidos estos valores se debe plantear las variables para la función objetivo y de esta manera aplicar una técnica de optimización lineal, de acuerdo a lo indicado en el cuadro 1.

Cuadro 1. Variables para Función Objetivo

Elemento de compensación	Potencia entregada al SEP X [\$]	Costos Totales por mantenimiento Y [\$]	Costos por Peajes Z [\$]
Banco de capacitores	A	B	N/A
Compensador síncrono	C	D	E

Las funciones objetivo para cada uno de los elementos son representadas por las siguientes ecuaciones:

- Banco de capacitores: $\min AX + BY$
- Generador Síncrono: $\min CX + DY + EZ$
- En caso que el nodo contenga banco de capacitores y generador síncrono se analiza de la siguiente manera: $AX + BY + CX + DY + EZ$

En estas ecuaciones el método de optimización lineal buscará despachar el máximo de potencia reactiva al más bajo costo. Previamente en los estudios de flujos de potencia se deberán obtener los perfiles máximos y mínimos de potencia reactiva, realizar un análisis de contingencia y evaluar la peor condición para el sistema en estudio. De esta manera, se sabrán las condiciones nominales y contingencia, con la finalidad de planificar el requerimiento de bancos de capacitores, compensadores síncronos y lo necesario para mantener el sistema en condiciones de operación normal.

Resultados

El SEP de prueba a utilizar es un IEEE-14 el cual posee 14 barras, 20 líneas de transmisión, 6 generadores síncronos, 9 cargas y 3 autotransformadores de interconexión. [21] La barra 1 es la de referencia y para el estudio de flujo de potencia las barras 2,3,6 y 8 son las barras P-V (Potencia-Tensión), necesarias para la regulación de estas variables en el sistema eléctrico. De igual manera, las restantes 9 barras tipo P-Q (Potencia Activa-Potencia Reactiva), las cuales representan los centros de consumo de la red eléctrica. Para el desarrollo de la metodología, por lo tanto, se deben seguir los siguientes pasos, de acuerdo a la figura 2.

Potencia Reactiva del sistema propuesto

Se realizó un análisis de contingencias únicas donde se obtuvieron los siguientes valores de potencia reactiva a fin de valorar los requerimientos de la potencia en cada una de las barras del sistema eléctrico tal y como se muestra en el cuadro 2.

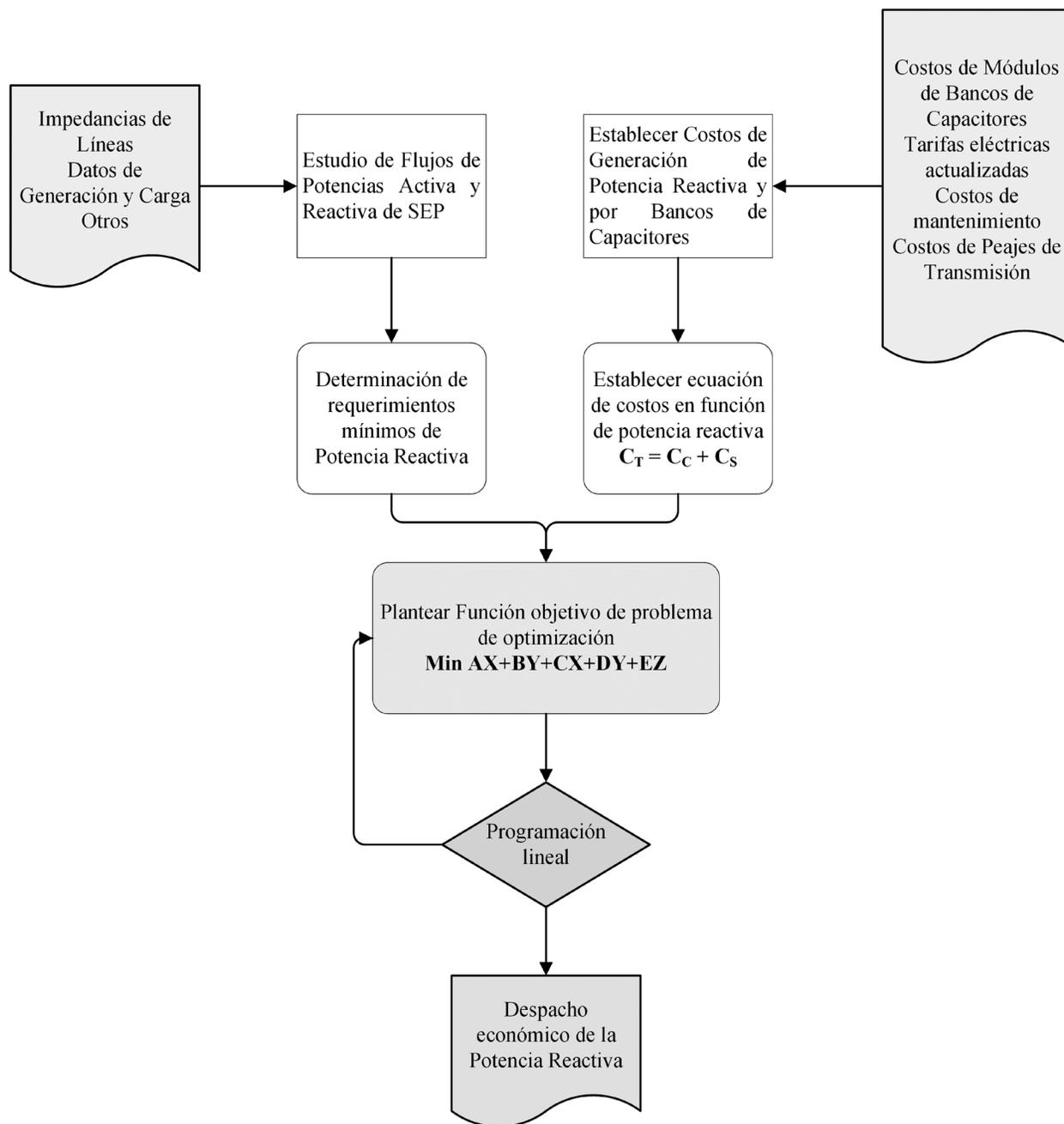


Figura 2. Flujograma de metodología para el cálculo óptimo de la potencia reactiva basado en datos de esta investigación.

Calculo de Potencia reactiva a partir de bancos de capacitores

Se obtienen los costos al utilizar bancos de capacitores en los nodos de interconexión, el costo aproximado de los módulos de compensación se puede obtener de la metodología de la remuneración de la actividad de transmisión de Colombia [22]. Tomando en consideración todos estos elementos se tiene los siguientes costos de potencia reactiva de acuerdo al cuadro 3.

Cuadro 2. Requerimiento de Potencia Reactiva en Barras del Sistema Propuesto.

Barra	Rangos de Potencia Reactiva [MVar]		Requerimiento de Potencia Reactiva [MVar]
	Q_{max}	Q_{min}	
1	24,268	-2,855	27,123
2	17,490	-23,925	41,415
3	1,358	-20,867	22,225
4	8,379	-14,953	23,332
5	13,858	-8,621	22,479
6	8,599	-4,902	13,501
7	14,487	-24,912	39,399
8	26,620	-2,777	29,398
9	3,902	-9,773	13,675
10	3,962	-3,962	7,925
11	4,374	-4,513	8,887
12	1,478	-2,404	3,882
13	2,902	-7,893	10,795
14	2,496	-2,650	5,146

Cuadro 3. Costos de Potencia Reactiva a partir de bancos de capacitores.

Barra	Requerimiento de Potencia Reactiva (MVar)	C_{mc} (\$)	t_u (horas)	t_{vu} (años)	Costos de Mantenimiento C_{mto}	Costos por insertar Bancos de Capacitores (\$)	Costo unitario de Potencia Reactiva \$/(KVar)
Barra 4	23,332	\$3.427.673	420	7	\$746	\$548.516,3	23,509
Barra 5	22,4791	\$3.427.673	420	7	\$746	\$528.492,6	23,510
Barra 7	39,3985	\$3.427.673	420	7	\$746	\$925.712,9	23,496
Barra 9	13,6753	\$3.427.673	420	7	\$746	\$321.803,9	23,532
Barra 10	7,9248	\$3.427.673	420	7	\$746	\$186.798,2	23,571
Barra 11	8,8869	\$3.427.673	420	7	\$746	\$209.385,6	23,561
Barra 12	3,8824	\$3.427.673	420	7	\$746	\$91.893,9	23,669
Barra 13	10,7948	\$3.427.673	420	7	\$746	\$254.177,8	23,546
Barra 14	5,1464	\$3.427.673	420	7	\$746	\$121.569,1	23,622
					Total	\$6.330.061,1	

Cálculo de Potencia Reactiva a partir de generadores síncronos

De acuerdo con lo planteado en la ecuación anterior, se obtienen los costos al utilizar generadores síncronos en los nodos de interconexión. Tomando en consideración todos estos elementos se tiene los siguientes costos de potencia reactiva conforme a los planteado en el cuadro 4.

Cuadro 4. Costos de Potencia Reactiva a partir de generador sincrónico.

Barra	Requerimiento de Potencia Reactiva (MVar)	Qgen (MVar)	Qprod (MVar/H)	C _E (\$/KWH)	t _u (horas)	C _{pl} (\$/MVA)	C _{mtto} (\$)	C _{MW} (\$/KW)	Datos Máquinas en MVA	Valor q	Límites de Generación		Costos por Generar Potencia Reactiva (\$)	Costo Unitario de Potencia Reactiva \$/KVar
											Qmáx	Qmín		
Barra 1	27,12	27,1228	85534462,1	\$0,06	360	\$0,1054	\$746	\$3,35	250	0,20	145		\$1.027.160,44	\$37,87
Barra 2	41,41	41,4146	130605083	\$0,06	360	\$0,1054	\$746	\$3,35	175	0,29	50	-40	\$2.239.692,23	\$54,08
Barra 3	22,22	22,2249	70088444,6	\$0,06	360	\$0,1054	\$746	\$3,35	90	0,44	40		\$1.869.772,82	\$84,13
Barra 6	13,50	13,5009	42576438,2	\$0,06	360	\$0,1054	\$746	\$3,35	120	0,20	24	-6	\$511.663,71	\$37,90
Barra 8	29,39	29,3975	92707956	\$0,06	360	\$0,1054	\$746	\$3,35	150	0,16	24	-6	\$890.743,16	\$30,30
												Total	\$6.539.032,36	

Costos Totales para SEP propuesto

El costo total mensual de \$12 869 836.2 para despachar y operar el sistema eléctrico propuesto, en las condiciones indicadas anteriormente. De esta manera una vez establecido el costo total se procederá a aplicar la optimización del SEP con el fin de cumplir el requerimiento de potencia reactiva demandada al menor costo económico.

Despacho Óptimo de la Potencia Reactiva del SEP propuesto

De acuerdo con lo planteado anteriormente, se procede a desarrollar una programación lineal para el despacho óptimo de potencia reactiva al menor costo. En ella, la función objetivo tendrá las siguientes consideraciones en la programación:

- Las barras 10,11,12,13 y 14, tendrán bancos de capacitores debido a la lejanía del centro de generación de cada una de las barras indicadas anteriormente. Los bancos de capacitores recomendados serán de 20 MVar, similares a los que se usan en el SEN. La principal limitante de estos dispositivos es que entregan la totalidad de la potencia y no dan posibilidad de regulación a diferencia de los compensadores sincrónico o generadores sincrónicos.
- En la barra 1 se tendrá conectado un generador sincrónico de gran capacidad que será capaz de entregar potencia reactiva hasta 145 MVar. La importancia de este es que debido a su condición se utiliza para regulación del SEP y el regulador de tensión se deja en modo automático para que este supla el requerimiento del sistema de potencia reactiva ante los cambios que sucedan en la red.
- En la barra 2 se tendrá conectado un generador que será capaz de entregar potencia reactiva desde un rango de 50 hasta -40 MVar. El signo negativo es que podrá consumirla en caso de requerimiento de regulación del SEP. Esta es una condición normal de operación.
- En barra 3 se tendrá conectado un compensador sincrónico con capacidad de entregar hasta 40 MVar.
- En la barra 6 y 8 se tendrá conectado un compensador sincrónico el cual será capaz de entregar potencia reactiva desde un rango de 24 hasta -6 MVar. El signo negativo es que podrá consumirla en caso de requerimiento de regulación del SEP. Esta es una condición normal de operación.
- El requerimiento de potencia reactiva máximo es de 269.18 MVar, este valor no puede ser inferior pues existiría el riesgo de colapso parcial o total del sistema.

Análisis de Escenarios

A continuación, se hará un análisis de escenarios a fin de validar el modelo propuesto. Para ello se considerará una utilización del 60% en promedio de los bancos de capacitores, la vida útil será de 7 años, pues estos son elementos sensibles a los ciclos de trabajo que tengan a lo largo de su ciclo de utilización. Los costos calculados en los generadores sincrónicos en los nodos de interconexión 1, 2, 3, 6 y 8 se muestran a continuación, se tomaron en cuenta un tiempo de uso de 360 horas de las 720 que puede tener un mes, esto representa una utilización del 50% aproximadamente de la típica de estos elementos al mes.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, se procede a desarrollar una programación lineal para el despacho óptimo de la potencia reactiva, la función objetivo tendrá las siguientes condiciones en la programación:

- i. Las barras 10, 11, 12, 13 y 14 tendrán bancos de capacitores debido a la lejanía del centro de generación de cada una de las barras indicadas anteriormente. Los bancos de capacitores recomendados serán de 20 MVar.
- ii. En la barra 1 se tendrá conectado un generador síncrono 145 MVar.
- iii. En la barra 2 se tendrá conectado un generador que será capaz de entregar la potencia reactiva, desde un rango de 50 hasta -40 MVar.
- iv. En la barra 3 se tendrá conectado un compensador síncrono con capacidad de entregar hasta 40 MVar.
- vi. En la barra 6 y 8 se tendrá conectado un compensador síncrono el cual será capaz de entregar la potencia reactiva, desde un rango de 24 hasta -6 MVar.

El requerimiento de potencia reactiva máximo es de 269.18 MVar, este valor no puede ser inferior pues existiría el riesgo de colapso parcial o total del sistema de acuerdo al estudio de flujos de potencia.

El requerimiento de potencia reactiva para el sistema eléctrico planteado es 269.18 MVar y un costo base inicial obtenido en el cuadro 3 de \$12 869 093.50. En el escenario pesimista considera una utilización de 60 MVar de los bancos de capacitores y un despacho mínimo de la generación en barra 1 de 72 MVar, por esta razón el costo total obtenido en la programación lineal es \$11 778 813.10, con un ahorro del 8.47%.

En escenario realista considera una utilización de 80 MVar y un despacho máximo de la unidad de la generación en la barra 1 de 112 MVar. Por esta razón el costo total obtenido de la programación lineal es \$9 344 862.60, con un ahorro del 27.39 %.

En escenario optimista considera una utilización de 100 MVar y un despacho máximo de la unidad de la generación en la barra 1 de 145 MVar. Por esta razón costo total obtenido es de \$8 584 718.95, con un ahorro del 33.39 %. En la siguiente grafica de resultados se puede observar el comportamiento de los escenarios planteados de acuerdo con las condiciones y requerimientos del sistema de potencia. En la figura 3 se observa el comportamiento de los escenarios ante las condiciones propuestas.

Costo del Despacho de Potencia Reactiva ante diversos escenarios vrs porcentaje de ahorro

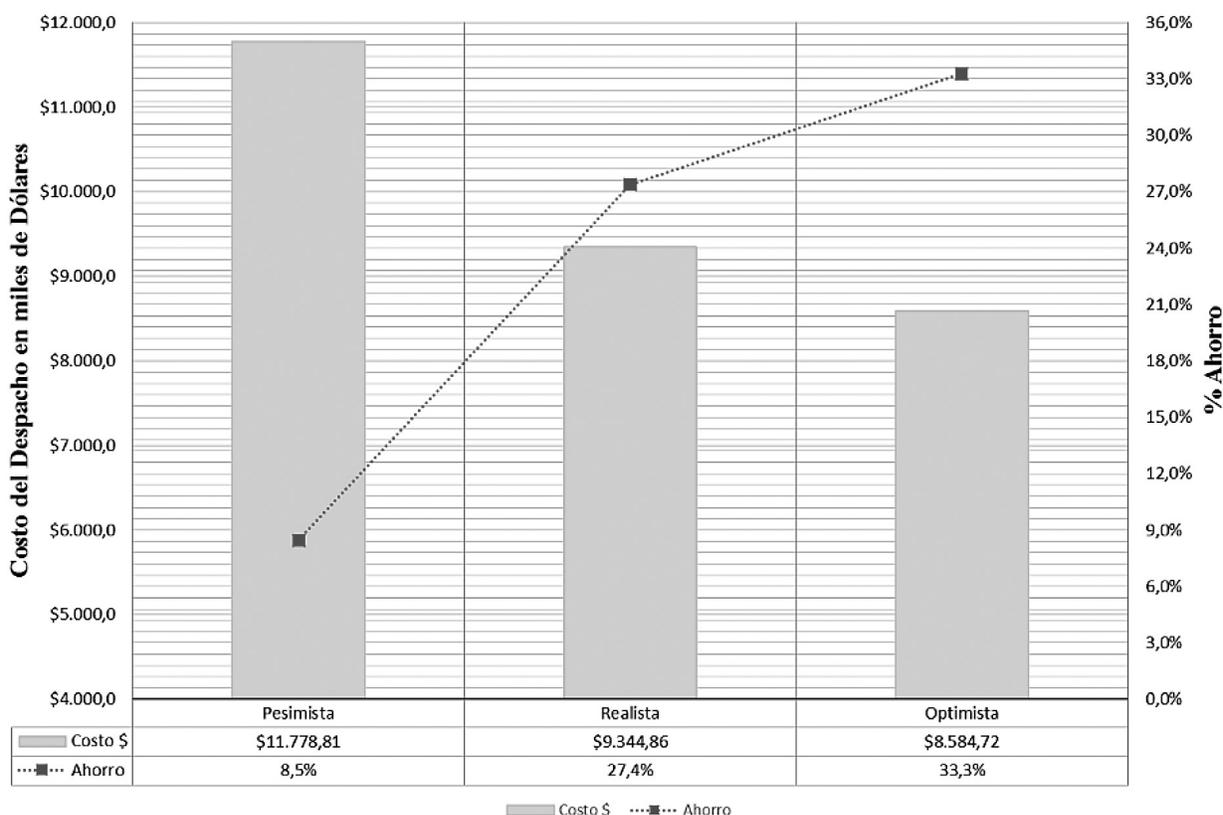


Figura 3. Comparación de Escenarios para el despacho de Potencia Reactiva para SEP propuesto basado en datos de esta investigación.

Discusión Final

Se logró desarrollar una propuesta de metodología capaz de hacer un despacho óptimo de esta potencia al menor costo. Por ello, se logró identificar los costos más importantes y relevantes, para posteriormente desarrollar una programación lineal a partir de una hoja electrónica en Microsoft Excel. Se logró proponer una metodología para el cobro de potencia reactiva y en ella, a partir de los datos del estudio de flujos de potencia, los costos de producir potencia reactiva, se plantea la función objetivo para resolver el problema de despacho económico [23]. En la parte B de la investigación se establecerá un modelo para el cobro diferenciado de las tarifas y de esta manera lograr proponer costos más bajos de la electricidad.

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela de Ciencias de la Administración y al Posgrado en Administración de Negocios de la UNED por las herramientas y conocimientos gerenciales adquiridos para realizar este proyecto de investigación.

Lista de Abreviaturas

ARESEP: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
 MER: Mercado Eléctrico Regional
 SEN: Sistema Eléctrico Nacional
 SEP: Sistema Eléctrico de Potencia
 KVAr: kilo Voltio Amperios reactivos
 kVArH: kilo Voltio Amperios reactivos-hora
 IEEE-14: Sistema Eléctrico de Potencia de prueba de 14 barras

Referencias

- [1] C. Hsu and M.-S. Chen, "Reactive Power Planning and Operation in the Deregulated Power Utilities," in *Electricity Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, London, England, 2000.
- [2] F. J. D. Miller, "Método de asignación de peajes de los sistemas de transmisión eléctrica según el uso de la red.," Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2001.
- [3] V. M. Doña and A. N. Paredes, "Reactive power pricing in competitive electric markets using the transmisión losses function," in *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 2001.
- [4] J. H. Tovar Hernández, M. Jiménez Jiménez and G. Gutiérrez Alcaraz, "Metodología basada en Sensibilidad para Asignar Costos de los Servicios de Control de Voltaje y Potencia Reactiva en Mercados Eléctricos Desregulados," *Computación y Sistemas*, pp. 58-66, 2002.
- [5] G. C. Tequiltlapa Gómez, "Asignación de cargos por servicios de control de voltaje y reservas reactivas en mercados de energía.," Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, 2002.
- [6] J. Zhong and K. Bhattacharya, "Reactive Power management in Deregulated Electricity Markets - A Review," *IEEE*, pp. 1287-1292, 2002.
- [7] R. V. Laguna, "Asignación de cargos por el porteo de flujos de potencia activa y reactiva en los sistemas de transmisión basada en el método del rastreo de la electricidad," CINVESTAV, Gualadajara, 2002.
- [8] V. B. Cortez Silva, "Señal de precios para la potencia reactiva en mercados descentralizados y competitivos.," Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2003.
- [9] J. I. S. Macías and P. C. Pérez, "Regulación de las tarifas de acceso a las redes y liberación del sector eléctrico español," *Revista de Economía pública*, pp. 61-83, 2003.
- [10] S. B. Barrangán Gómez and J. Robles García, "Costo por el soporte de voltaje de los generadores en," *Científica*, pp. 113-117, 2006.
- [11] A. Carbajo, "Los mercados eléctricos y los servicios de ajuste del sistema," *Red Eléctrica de España*, pp. 55-62, 2007.
- [12] H. S. Oh and R. J. Thomas, "Real and Reactive Power Prices and Market Power," *IEEE*, 2007.
- [13] H. R. R. Valenzuela, "Efectos económicos que conlleva la prestación del servicio de regulación de voltaje, por un agente generador asociado al sistema nacional interconectado," Universidad de San Carlos, Guatemala, 2008.
- [14] A. Rabiee, H. Ali Shayanfar and N. Amjady, "Reactive power pricing. Problems & a proposal for a competitive market," *IEEE power & energy magazine*, pp. 18-32, 2009.
- [15] K. Abinaya, D. Danalakshmi and S. Kannan, "Cost Analysis of Reactive Power Using Marginal Cost Theory in Electricity Markets," *2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies*, pp. 79-83, 2014.
- [16] R. Kumar and A. Kumar, "Real and Reactive Power Price of Generators to Load in Pool Based Electricity Market Model," in *Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015 International Conference on*, Noida, India, 2015.



- [17] M. Eremia and M. Shahidehpour, *Handbook of Electrical Power System Dynamics*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013.
- [18] ARESEP, *AR-NT-POASEN-2015*, San José, 2016.
- [19] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis*, Tokyo: McGraw-Hill, 1983.
- [20] B. Stott, "Review of Load Flow Calculation Methods," *Proceedings of IEEE*, pp. 916-929, 1974.
- [21] University of Washington, "https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm," 10 abril 2018. [Online]. Available: <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [22] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Metodología para la remuneración de la actividad de transmisión de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional," CREG, Bogota, 2016.
- [23] M. Eremia and S. Nilsson, "Series Capacitive Compensation," in *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, New York, John Wiley & Sons, Inc, 2016, pp. 339-407.
- [24] A. Gómez Expósito, J. L. Matínez Ramos, J. A. Rosendo Macías, E. Romero Ramos and J. M. Riquelme Santos, *Sistemas Eléctricos de Potencia*, Madrid: PEARSON, 2003.
- [25] ARESEP, "<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2I2YTM1MzEtYzlmYS00NmE1LWFIM2QtYWM2YTZyYTEzMmFliiwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZIMzM1MWQyNDcwZCIslmMiOjR9>," 12 abril 2018. [Online]. Available: www.aresp.go.cr.
- [26] ARESEP, *Ley que Autoriza la Gneración Eléctrica Autónoma o Paralela*, San José, 1995.
- [27] ARESEP, *Reglamento Sectorial de Sectores Eléctricos*, San José, 2001.

Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica

Composting of biodegradable wastes from the university restaurant at Tecnológico de Costa Rica

Raizeth Chaves-Arias¹, Rooel Campos-Rodríguez²,
Laura Brenes-Peralta³, María Fernanda Jiménez-Morales⁴

Fecha de recepción: 16 de enero de 2018
Fecha de aprobación: 13 de abril de 2018

Chaves-Arias, R; Campos-Rodríguez, R; Brenes-Peralta, L;
Jiménez-Morales, M. Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 39-53.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4117>



- 1 Estudiante Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: raizethchavesarias@gmail
- 2 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador del Área Académica Agroforestal Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>
- 3 Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Gerencia y Gestión Ambiental. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr
- 4 Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr

Palabras clave

Residuos biodegradables; Takakura; compostaje; valorización de residuos.

Resumen

En procura de un mejor aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables del restaurante Institucional del Tecnológico de Costa Rica, Sede Cartago, se evaluaron tres tratamientos de compostaje para la generación de abono orgánico. Para esto se seleccionaron técnicas de acuerdo a criterio experto y se valoraron variables como pH, humedad, temperatura y eficiencia, con el fin de determinar la más eficiente que permita la valorización del residuo.

Se utilizó un diseño experimental factorial, en el cual se compararon los tres tratamientos denominados Takakura (TK), Microorganismos de Montaña (MM) y Pellets (P) con Residuos Sólidos Biodegradables cada uno, en compostera de volteo y otro directamente en una superficie de concreto en el suelo, con dos repeticiones. El valor de p utilizado fue de 0,05.

Se determinó que el tratamiento Takakura fue el que mejores resultados presentó desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, alcanzando la mayor temperatura promedio (53°C) y la fase termófila más rápidamente, manteniendo un pH, cercano a 7, humedad entre 50 y 70% y eficiencia del 81%, por lo que se concluye que este tratamiento es una estrategia viable de economía circular para el aprovechamiento de residuos biodegradables del restaurante institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Keywords

Biodegradable waste; Takakura; composting; waste valorization.

Abstract

The university restaurant from Tecnológico de Costa Rica's main Campus in Cartago, has the purpose of a better waste management; therefore, three composting methods were evaluated to produce organic fertilizer from its biodegradable residues. The researchers selected the techniques through expert's opinion, assessing variables like pH, temperature, moisture and efficiency in each technique, in order to determine the most efficient one to re-valorize the organic waste.

A factorial experimental design was selected, in which three treatments were compared: Takakura (TK), Mountain microorganisms (MM) and Pellets (P) with biodegradable solid wastes on each case, in tumbling composters and in pile composters (on the ground), with two repetitions. The used p value was 0,05.

As a result, the Takakura treatment showed the best results from a technical, environmental and economic point of view, since it reached the highest average temperature (53°C) and achieved the thermophilic phase faster than the other ones, maintaining the expected indicators for proper composting, such as a pH close to 7, moisture between 50% and 70% and efficiency of 81%.. Consequently, the researchers conclude this treatment represents a valid strategy to aim towards a circular economy approach at the university's restaurant from Tecnológico de Costa Rica.

Introducción

A nivel global, entre un cuarto y un tercio de los alimentos producidos anualmente para consumo humano se pierde o se desperdicia. El desperdicio equivale a más de 1 300 millones de toneladas de alimentos anualmente. En promedio se pierde o desperdicia el 30% de los cereales, entre el 40 y el 50% de las raíces, frutas, hortalizas y semillas oleaginosas, el 20% de la carne y productos lácteos, y el 35 % de los pescados. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) calcula que dichos alimentos serían suficientes para alimentar a 2 000 millones de personas [1].

En las últimas décadas, la generación de residuos sólidos ha ido aumentando potencialmente en el mundo, incluyendo a países como Costa Rica [2]. Estudios puntuales indican que la generación de residuos sólidos biodegradables es de alrededor del 44 al 52% del total de residuos sólidos generados, dependiendo del estrato social o zona del país [3]. Encontrar opciones sostenibles para un manejo integral es de suma importancia para reducir el impacto ambiental negativo que la ausencia de tratamiento ocasiona, además del potencial uso como sustrato, enmienda o fertilizante en actividades agrícolas tras su compostaje [4].

Por tal motivo el país debe apostar a estrategias de economía circular donde en primera instancia se busque la reducción de las entradas a los procesos productivos, es decir, la reducción en la fuente, y el aprovechamiento de los residuos que se generen en los mismos, jugando la gestión integral de los residuos un papel fundamental para el éxito de la estrategia.

Respaldando lo anterior, el 13 de Julio del año 2010 se creó la Ley para la Gestión Integral de Residuos 8839 dictada por la Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, que indica que los entes generadores deben contar con planes para una gestión integral de residuos, misma que define la ley como “*conjunto articulado e interrelacionado de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta la disposición final*”[5].

Dentro de las alternativas para aprovechar los residuos biodegradables se encuentra el compostaje, que es un proceso bio-oxidativo de los residuos orgánicos en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, el cual convierte los residuos orgánicos degradables en un material estable e higienizado [6].

Los principales parámetros para el desarrollo efectivo del compostaje son la temperatura, humedad y el pH. Respecto a la temperatura, el proceso de compostaje comprende cuatro fases, una mesófila, donde el material aumenta su temperatura a rangos de 20 a 35 C; una termófila, donde asciende de 35 a 65 C y se digieren las moléculas complejas, por lo que facilita la eliminación de microorganismos patógenos; una fase de enfriamiento y finalmente una de maduración [7].

En cuanto al pH en el compostaje se da en tres fases. En la inicial se observa una disminución del mismo debido a la acción de los microorganismos en la materia orgánica fácilmente degradable, lo cual produce una liberación de ácidos orgánicos; en la segunda fase se produce una alcalinización progresiva del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y a la liberación de amoníaco procedente de la descomposición de proteínas, y en la tercera, el pH tiende a la neutralidad por la formación de compuestos orgánicos del suelo [8].

Si durante el proceso de compostaje el pH es bajo, se inhibe la degradación orgánica, pero si el pH se mantiene por encima de 7,5 o cercano a este valor, se puede decir que hay suficiente descomposición [4].

La humedad, es una de las variables de compostaje que afecta de manera considerable a las actividades microbianas, ya que proporciona un medio para el transporte de nutrientes disueltos necesario para las actividades metabólicas y fisiológicas de los microorganismos [9]. La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%. La actividad biológica decrece cuando la humedad está por debajo del 30% y por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso [8].

El aprovechamiento por medio de compostaje, consiste en la utilización de sustratos con inóculos microbiales, entre ellos el Takakura y los MM (microorganismos de montaña).

El inóculo MM se deriva de sustratos recolectados en ecosistemas silvestres como hojarasca, que al colocarlos en una determinada mezcla con otros ingredientes propicia una elevada y diversa calidad nutricional. Estos medios son ideales para el establecimiento y multiplicación de las diversas especies de microorganismos colectados. El método Takakura, es una técnica de conversión de los residuos orgánicos del hogar a abono orgánico, donde se utilizan microorganismos fermentativos provenientes de cáscaras de fruta o comida fermentada [4].

También se pueden utilizar pellets que son cilindros de aserrín prensado, virutas o polvo de madera y que ayudan a la descomposición de los residuos, mantenimiento de una humedad adecuada, lo que repercute en la temperatura, pH relación C/N favoreciendo el accionar de los microorganismos para la descomposición [9].

Es necesario tomar en cuenta que todo aprovechamiento de residuos trae consigo una serie de costos sociales, económicos o ambientales; por tal razón, la economía y el ambiente son elementos mutuamente dependientes, ya que el uso de los recursos y las condiciones del entorno varían según el desarrollo económico [10].

Entre las principales ventajas que tiene la valorización de los residuos sólidos biodegradables, se encuentran la posibilidad de cerrar el ciclo de la materia orgánica en el sistema, por medio de la mineralización realizada por los microorganismos que garantizan la reincorporación al suelo, la reducción de residuos sólidos destinados a los vertederos locales lo cual se traduce en una disminución de las emisiones que conllevan la descomposición de la materia orgánica, la generación de ahorro y el decremento en los costos en los que incurre el transporte, combustión y el tratamiento de esos residuos.

Además, el producto terminado del compostaje se comporta como un potenciador de la productividad del suelo natural y la adecuada gestión integral de los residuos sólidos biodegradables, y actúa como una vía de educación ambiental para cada individuo de la sociedad.

Por tal razón, el objetivo de la presente investigación es evaluar alternativas de compostaje de los residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica, con el fin de brindar una posibilidad para la valorización de los residuos sólidos biodegradables.

Metodología

La investigación se realizó en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Sede Central de la Universidad, en el Cantón Central de la Provincia de Cartago, en el distrito Oriental, Barrio Los Ángeles 9°51'16"N 83°54'33"O.

Diseño del Experimento

Se utilizó un diseño experimental factorial, el cual comparó tres tratamientos denominados Takakura (TK), Microorganismos de Montaña (MM) y Pellets (P), y a cada uno de ellos se incorporó Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo y directamente sobre una superficie limpia de concreto sobre el suelo, con dos repeticiones cada uno.

Estos tres tratamientos tuvieron el debido seguimiento del proceso de compostaje. Primero, se adicionó los RSB provenientes del restaurante institucional incorporando los insumos propios de cada tratamiento. Luego se inspeccionó el comportamiento por medio de mediciones de temperatura, pH y humedad, y por último se obtuvo el compost, cuyas características también fueron revisadas.

El cuadro 1, muestra las cantidades, días de aporte y sistema utilizado en cada repetición para las alternativas propuestas en la investigación.

Cuadro 1. Estructura de diseño de los tratamientos de compostaje propuestos.

Tratamiento	Compostera de volteo	Suelo	Kg de RSB inicial	Cantidad de inoculante inicial	Total de días de aporte de RSB	Kg de RSB total	Kg total de RSB + inoculante
TK +RSB	X	X	6	20 Kg	10	60	80
MM + RSB	X	X					
P + RSB	X			1,2 Kg *			72

*Se colocó 1,2 kilogramos de Pellets por cada aporte de residuos.

El experimento se desarrolló entre los meses de abril a setiembre de 2017, en los cuales se aportó RSB por 10 días a cada uno de los tratamientos y se dejó 20 días en reposo.

Recintos y compostera utilizados para la realización de los tratamientos

En el caso de los tratamientos vía compostera de volteo, se utilizó el modelo JK 400 con dimensiones de 1400 x 800 (mm) de hierro galvanizado, con doble cámara. El sistema es completamente cerrado y su material de fabricación permite temperaturas altas y ácidos orgánicos típicos del proceso, mínimos olores y capacidad de operación de 16 kg por día por cámara.

Se utilizaron dos composteras de este tipo, mismas que se encontraban resguardadas de la lluvia en el Campo de Prácticas e Investigación Agropecuaria de la Escuela de Agronegocios como se muestra en la figura 1.

En cuanto a los tratamientos en suelo, se utilizó una infraestructura en las instalaciones del Campo de Prácticas Docentes e Investigación Agropecuaria de la Escuela de Agronegocios, cuyas dimensiones son 5 metros de ancho y 30 metros de largo, con suelo de cemento, ventilación y resguardado para evitar que animales intervinieran en el experimento.

Preparación y adición de los RSB

Los RSB estaban conformados por una mezcla de residuos de alimentos del desayuno, almuerzo o cena, acorde a la disponibilidad. Dentro de la variedad de residuos se pueden

mencionar cáscaras de frutas, hojas de hortalizas, restos de arroz, frijoles, vegetales, huesos, pan, cáscaras de huevo, entre otros.

Se trasladaron a la Escuela de Agronegocios, se trituraron hasta un diámetro de 2 milímetros y se colocaron en una malla para que drenaran y así disminuir el exceso de humedad.



Figura 1. Compostera de volteo.

Medición de Variables

Se midieron las variables de temperatura del proceso de compostaje, pH y humedad, utilizando instrumentos de precisión para su cuantificación. Se construyeron hojas de Excel para el registro respectivo de los datos.

Temperatura

La temperatura interna de cada tratamiento se tomó de forma diaria durante 24 días. El termómetro fue colocado en un punto medio de cada tratamiento para captar la lectura correspondiente.

pH

La medición de la acidez se realizó con la utilización de un pH-metro HI 98127 contra agua. El bulbo del instrumento medidor se insertó en el medio de las diferentes mezclas, se dejó estabilizar la medición por 5 minutos. La medición de los datos se realizó diariamente durante 24 días para cada tratamiento.

Humedad

La medición del porcentaje se realizó con un medidor de humedad relativa BK precisión modelo 725, el cual se introdujo en el medio de cada una de los tratamientos, se esperó por 5 minutos y se realizaron en total, seis mediciones para cada tratamiento.

Costos económicos

Se cuatificó cada uno de los rubros necesarios para llevar a cabo el proceso de compostaje y se expresó el costo en colones y dólares por kilogramo de residuo sólido biodegradable tratado. Además, se calculó el carbono equivalente por año que se dejaría de emitir al tratar los residuos por compostaje.

Resultados y discusión

Propuesta de mezclas para el proceso de compostaje

Tomando en cuenta investigaciones realizadas recientemente en el tema de compostaje por investigadores del TEC [3,4,10], criterio experto y apoyándose en bibliografía se trabajó en dos modalidades para determinar la efectividad de cada uno de los tratamientos postulados. La primera consistió en una compostera de volteo JK400 en la cual se evaluaron los sustratos Takakura, microorganismos de montaña y pellets de madera; la segunda modalidad fue el composteo en suelo con los sustratos Takakura y Microorganismos de montaña.

La selección de una modalidad u otra, va determinado por la elección que más le convenga al desarrollador, ya que ninguno de las modalidades está catalogada mejor que el resto. Se elige la que más se adecua a las cantidades y tipos de residuos que se desean compostar, al espacio que se dispone, o a las condiciones económicas [11].

Por tal motivo el resultado fue la elección de tres diferentes mezclas (tratamientos) como se detalla a continuación.

- 1) Takakura (TK) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB), en compostera de volteo y suelo.
- 2) Microorganismos de Montaña (MM) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo y suelo.
- 3) Pellets (P) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo

El Takakura y los Microorganismos de Montaña han sido probados en varias investigaciones, donde, por ejemplo, [12] obtuvieron como resultado que el uso de sustratos microbiales, como TK y MM en el compostaje doméstico, reduce, estabiliza y transforma los residuos biodegradables en compost inocuo de alta calidad química, física y microbiológica.

De igual forma [12], señalan la calidad del proceso de compostaje y la calidad del compost obtenido por medio del sustrato Takakura presenta mejores características, en comparación con el compost del sustrato MM. Además, señalan que la utilización de TK y MM presentan comportamientos adecuados para la degradación de los residuos sólidos, con temperaturas superiores a 50 °C, una evolución de pH adecuada para este tipo de compostaje y una reducción en altura del volumen del material de compost. Además, indican que no se observaron lixiviados ni se percibieron olores desagradables, ni se tuvo presencia de insectos en los sitios de procesamiento. Igualmente, señalan que por ambos métodos se obtuvo un abono inocuo y con características apropiadas para ser utilizado en huertas caseras, se identificaron diferencias significativas entre los procesos en cuanto a las variables temperatura y altura, no así en cuanto al pH. El compostaje con el método TK alcanzó una mayor temperatura y el volumen disminuyó más que con el MM, por lo que fue más eficiente en la reducción del residuo.

También [10], en un estudio donde compararon el TK respecto al MM y otros dos tratamientos en el crecimiento del cultivo de lechuga se determinó que a pesar de que el proceso de obtención de compost por el método Takakura tiene un costo mayor que el de MM, los beneficios dados por la eficiencia técnica (tamaño y diámetro de las lechugas) y ambiental lo postulan como el mejor de los tratamientos.

Por último [4], al probar TK y MM, indican que para ambos tratamientos se alcanzaron temperaturas termófilas superando los 50°C, necesaria para la eliminación de patógenos, y se mantuvieron en el rango óptimo por debajo de los 70°C.

Además, señalan que el Takakura presentó el mejor comportamiento en cuanto a temperatura promedio con diferencias significativas ($p=0,0002$). De igual forma variables como pH, reducción del volumen de los residuos, fitotoxicidad y grado de germinación, estos últimos dos factores en pruebas del producto para su uso en huertas caseras, hacen concluir que el compost obtenido por medio de la técnica Takakura presenta mejores resultados respecto al aprovechamiento del residuo y calidad del compost.

Respecto al uso de Pellets, éste fue exclusivo para la compostera de volteo, esto por recomendación de la casa fabricante y además porque los comprimidos de madera logran una superficie de contacto adecuada para reducir la humedad a un punto óptimo y así obtener un compost de calidad. También estos comprimidos coadyuvan a la degradación de los residuos y al mantenimiento de la temperatura, son una opción efectiva, inocua, barata y estandarizada para complementarla con las composteras de volteo [13].

VARIABLES EVALUADAS

Temperatura de los tratamientos propuestos

Las temperaturas iniciaron su aumento a partir del primer aporte de residuos sólidos alcanzando temperaturas termófilas 35 °C a 65 °C (cuadro 2), en los tratamientos TK en ambas repeticiones, así como MM desde el primer día. En el caso de los Pellets a partir del cuarto día inició el ascenso hacia fase termófila 35 °C a 65 °C, pero fue el tratamiento con las temperaturas más bajas en promedio, dado que solamente se obtuvieron incrementos de temperatura al agregar los RSB, pero no se logró mantener a lo largo del experimento, esto por no contar con un inóculo para el aumento de temperatura, lo que provoca que exista mayor variabilidad de los datos.

Cuadro 2. Temperaturas promedio de los tratamientos propuestos en repeticiones 1 y 2.

Temperaturas promedio (°C)	
TKR2 (volteo)	53,39
TKR1 (volteo)	51,17
MMR1 (volteo)	49,1
TKSR1 (suelo)	47,93
MMSR1 (suelo)	47,55
TKSR2 (suelo)	46,78
MMSR2 (volteo)	46,36
MMR2 (suelo)	42,83
PR1 (volteo)	42,04
PR2 (volteo)	39,96

R1: Repetición 1.

R2: Repetición 2.

S: Suelo

Para los tratamientos en suelo (TK, MM) las temperaturas también siguieron un patrón de ascenso, mostrando temperaturas termófilas, sin embargo, las máximas alcanzadas, así como los promedios fueron menores que en compostera de volteo.

La figura 2 muestra la relación de temperaturas para cada tratamiento. El Tratamiento TK fue el que alcanzó las mayores temperaturas en volteo, seguido del MM en volteo y TK en suelo, posteriormente el tratamiento de MM suelo y por último el P. Debido a que el TK y MM contienen un inoculante en la mezcla, provoca la activación de los microorganismos al colocar los residuos sólidos, coadyuvando al alza desde el primer aporte.

Las pruebas estadísticas evidencian diferencias significativas ($p=0,0001$) siendo Takakura en volteo la que alcanzó mayor temperatura, superior al tratamiento con Pellets y similar al TK en suelo (figura 3).

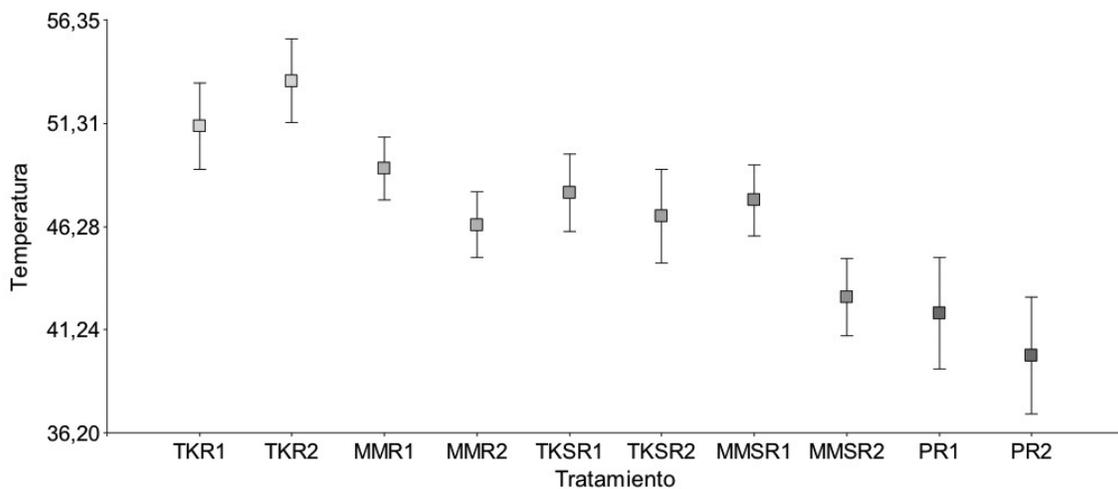


Figura 2. Mediciones de temperaturas de los tratamientos propuestos.

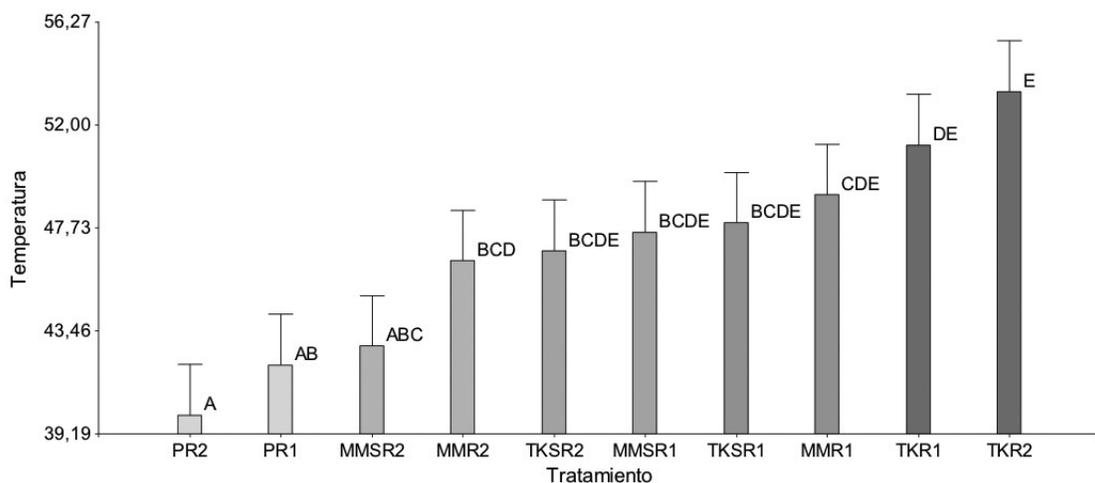


Figura 3. Temperatura de los tratamientos de compostaje de residuos de alimentos. Letras diferentes denotan diferencias significativas.

pH

Respecto al pH, se evidencia que todos los tratamientos presentaron los valores más bajos al inicio del proceso (días 1 al 5) debido a la liberación de ácidos orgánicos, durante los días del 10 al 20 aumentan los valores por la disposición de amoníaco y en el día 24 se tiende a un pH neutro (cuadro 3), por lo que se evidencia la descomposición de los residuos sólidos biodegradables.

Cuadro 3. Mediciones de pH de los tratamientos propuestos.

Día	MM	TK	P	MMS (Suelo)	TKS (Suelo)
1	6,5	5,0	4,5	5,4	5,68
5	7,0	6,5	5,7	6,7	6,4
10	8,5	7,9	8,3	8,1	8,3
15	8,2	7,8	6,8	7,7	8,1
20	7,9	7,5	7,4	7,8	7,4
24	7,8	7,1	7,1	7,43	7,02

Se obtuvo un valor de $p=0,5740$ por lo que estadísticamente indica que no hay diferencias significativas entre las medias de cada una de los tratamientos que se plantearon (figura 4).

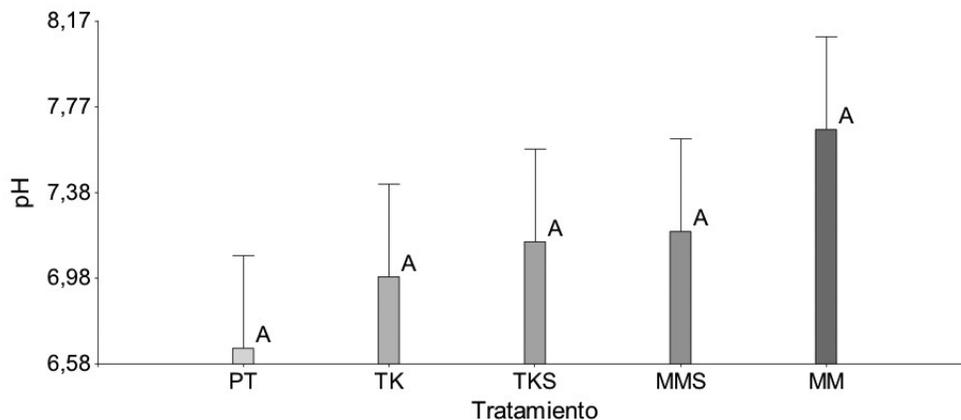


Figura 4. Acidez (pH) de los tratamientos de compostaje de residuos de alimentos. Letras diferentes denotan diferencias significativas.

Humedad

La humedad en el compostaje está relacionada con el contenido de agua de los materiales originales, la actividad biológica, el contenido de oxígeno, la porosidad de los materiales y la temperatura [14].

Los microorganismos requieren de agua para asimilar nutrientes, metabolizar nuevas células, catabolizar biomoléculas y reproducirse. La humedad máxima en un proceso de compostaje dependerá de la porosidad y absorción de los materiales, sin embargo, un contenido entre 50 – 70% es recomendado como óptimo [14 y 8].

La humedad tiende a disminuir con el avance del proceso de compostaje, debido a la evaporación. Si la humedad baja del 40% la actividad biológica disminuye y la descomposición se vuelve lenta, debido a que los nutrientes ya no están disponibles para los microorganismos por no estar en un medio acuoso. La actividad de estos es completamente inhibida por debajo del 15% de humedad [14].

Según el cuadro 4, se nota que todos los tratamientos siguieron un comportamiento normal y se encuentran dentro de los rangos esperados para un proceso de compostaje. Las humedades en los casos del volteo para MM y TK fueron menores que en suelo, esto debido a las condiciones de temperatura que presentaron los tratamientos, favoreciendo el aumento de ésta la pérdida de humedad. El P obtuvo la máxima humedad, inclusive que los tratamientos en suelo, y esto se debió a las bajas temperaturas en promedio alcanzado por P (42°C y 39 °C), lo que denota diferencias significativas ($p=0,0343$) en la humedad entre MM, TK y P (figura 5).

Cuadro 4. Humedad (%) durante el proceso de compostaje.

Día	MM	TK	P	MMS (suelo)	TKS (suelo)
1	66	63	72	65	65
5	60	61	68	64	61
10	57	57	65	64	58
15	54	55	61	62	56
20	51	53	60	61	53
24	49	49	57	60	51

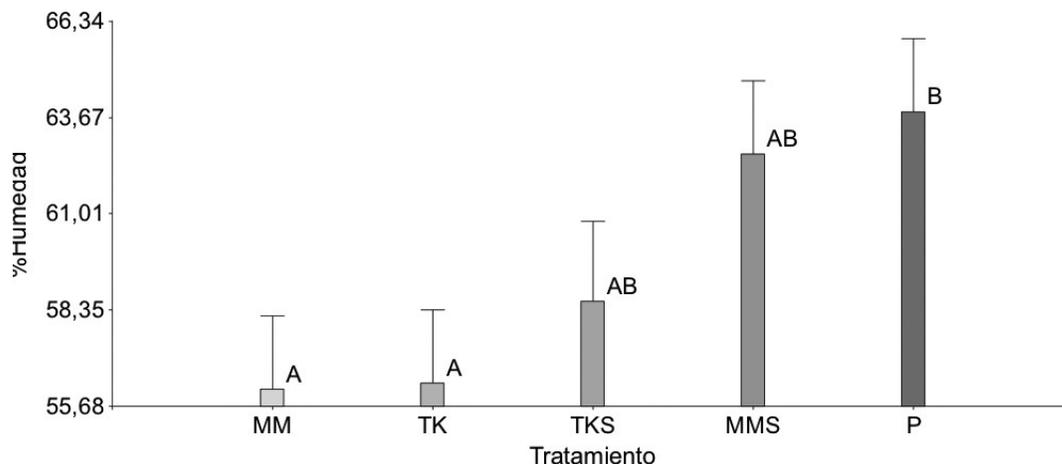


Figura 5. Diferencias significativas de % humedad de los tratamientos propuestos.

Eficiencia

La determinación de la eficiencia en el proceso de compostaje fue dada porcentualmente, en la cual participan el peso inicial a los 10 días de terminado el aporte con respecto al peso del material que resultó.

$$\% \text{ Eficiencia} = 100 - ((\text{peso final del material} * 100) / \text{peso inicial del material})$$

El cuadro 5 presenta los porcentajes de efectividad de cada uno de los tratamientos, es decir, la capacidad de disminuir la cantidad de residuos sólidos biodegradables incorporados.

Con respecto a las pruebas realizadas la mayor eficiencia se alcanzó en volteó con TK (86,88%), seguido por el tratamiento MM y con diferencias significativas entre ambas ($p < 0,0001$). Esto demuestra que en ambos casos el contar con un inóculo favorece la disminución del volumen de los residuos sólidos biodegradables, dadas las temperaturas termófilas alcanzadas y el porcentaje de humedad entre el 50% y 70% en los tratamientos.

Cuadro 5. Eficiencia del compost final de los tratamientos propuestos.

Modalidad	Tratamientos	cantidad de inóculo (kg)	cantidad de RS colocados (kg)	Kg de compost obtenido	Eficiencia
Suelo	TK	40	120	47,5	70,32
	MM	40	120	51	68,13
Compostera de volteo	TK	20	60	15	81,25
				10,5	86,88
	MM			18	77,50
				25	68,75
	Pellets			12	65,28
				12	62,50

*cantidad de pellets incorporado, no es inóculo.

pH y humedad del compost

En el cuadro 6 se observa como el pH del compost proveniente del proceso de volteo es más cercano a lo neutro, valor que sería lo ideal, aunque se debe tomar en cuenta que el rango óptimo es de 6,0 a 8,5 [15]. Por tal razón, el resultado por resaltar es que los compost de volteo presentaron mejores características que los de suelo. Lo anterior también se ve reflejado en la humedad, la cual debe ser de 35 a 45% [16].

Los contenidos de humedad del compost se acercan más a lo ideal, aunque se determina una oportunidad de mejora, ya que contenidos bajos de humedad favorecen el transporte del material final, pero dificultan el manejo y la aplicación debido al polvo que se origina, por ejemplo, si este se usara como enmienda al suelo.

Cuadro 6. Resultados de pH y humedad del compost.

Tratamiento	pH	Humedad (%)
PT (volteo)	7,01	33,18
TKT (volteo)	7,84	33,33
TKT (suelo)	8,26	20,40
MMP (suelo)	8,38	21,42

Costos económicos y valoración ambiental del proceso de compostaje

Para todos los tratamientos se tomó en cuenta el costo de los materiales, la mano de obra, inversión, transporte, análisis de laboratorio, así como todas las cargas de ley respectivas. El cuadro 7 presenta el costo total por kilogramo de residuo tratado, es decir, el costo de compostar un kilogramo de residuo sólido biodegradable

Cuadro 7. Costo por kilogramo de Residuo Sólido Biodegradable compostado.

Tratamiento	Costo en colones	Costo en dólares
Takakura	429,62	0,76
Microrganismos de Montaña	430,69	0,76
Pellets	810,53	1,43

* Banco Central de Costa Rica, tipo de cambio 568,59 colones costarricenses. Al 19 de diciembre del 2017

Básicamente, los costos de operación en compostera de volteo y suelo son los mismos, claro está, sin tomar en cuenta el valor de las composteras de volteo y de las instalaciones donde se realiza el compostaje en suelo, por ser parte de la inversión inicial.

Del cuadro 7 se desprende que el Takakura y MM son los tratamientos que representan los menores costos económicos, pero se debe tomar en cuenta que el TK a lo largo de esta investigación ha demostrado mejores resultados técnicos.

Dados los buenos resultados del TK en todas las variables analizadas, ambientalmente se estaría reduciendo el volumen de los residuos en la salida del proceso, además de generar un compost con valor productivo y de inocuidad apropiado, por lo que la estrategia de economía circular se estaría cumpliendo.

Tomando en cuenta los factores de emisión de gases efecto invernadero del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica para el año 2017, con un factor de emisión de 0,0581 kg CH₄/kg de residuos sólidos, si se lograra estabilizar los residuos sólidos biodegradables por medio de compostaje y tratar los 229,16 kilogramos por día que se generan en el restaurante institucional (cuadro 8), bajo un escenario de 5 días por semana y 32 semanas al año (solo

periodo lectivo), se dejarían de emitir, 44, 7 toneladas de CO₂ equivalente al año, por la disposición en relleno sanitario, mientras que en compostaje se emitirían 37,18 toneladas de CO₂ equivalente al año.

Cuadro 8. Generación de residuos sólidos biodegradables en el restaurante institucional.

Generación de RS en el restaurante institucional	Día	Semana	Año
Kg	229,16	1145,8	36665,6
Toneladas	0,22916	0,11458	33,666

Fuente: [17]

Conclusiones

Una gestión adecuada de los residuos sólidos orgánicos no solo afecta positivamente a la gestión de residuos en general, sino que también contribuye a la gestión sostenible de los recursos, a la protección del suelo y ayuda a combatir el cambio climático [18]. La implementación de las propuestas de compostaje de esta investigación se postula como actividades potencialmente sostenibles que contribuyen a un sistema ambiental integral dentro del Tecnológico de Costa Rica, que contribuye a la economía circular.

Las diferentes mezclas propuestas para tratar los residuos sólidos biodegradables cumplieron en general, ya que se presentó una reducción de los residuos. La mezcla TK fue la que brindó los mejores resultados en la compostera de volteo y en general los tratamientos en volteo resultaron ser mejores técnicamente, que los de suelo, ya que el sistema cerrado de las mismas permitió un mejor control de las variables analizadas. Por tal motivo las mezclas propuestas son acertadas para la valorización de los residuos sólidos biodegradables impactando positivamente en el ambiente y la economía circular.

Respecto a las variables analizadas, la temperatura se comportó según lo esperado, es decir, un aumento de la misma según se incrementaban los días de aporte de residuos sólidos hasta alcanzar temperatura termófila y luego su enfriamiento en la etapa de reposo.

Las temperaturas en volteo fueron mayores que en suelo, siendo TK (53,39°C) la que alcanzó el máximo valor promedio. Además, se presentaron diferencias significativas ($p= 0,0001$).

Respecto al pH, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($p= 0,5740$) y todos estuvieron cercanos a un pH neutro al final del proceso de compostaje, lo cual es adecuado para el mismo.

Respecto a la humedad, en volteo, las bajas temperaturas del tratamiento P, hicieron que éste tuviera el valor promedio más alto respecto a esta variable (64%), pero en los casos de MM y TK dada la elevada temperatura alcanzada provocaron una humedad ideal para el proceso de compostaje, superando a los tratamientos en suelo.

El tratamiento TK y MM presentaron los menores costos por kilogramo de residuo biodegradable tratado, pero si se toman en cuenta las variables analizadas, el TK supera al MM, por lo que se convierte en una buena alternativa de valorización de residuos, ya que se logra interiorizar las externalidades al aprovechar el residuo sólido y sacarlo de la corriente de descarte (economía

circular), además de ser una solución de bajo costo, eficiente y segura, lo que permite crear un ciclo integral de los residuos que se generan, el cumplimiento de la ley 8839 y evita costos en la disposición final en el relleno sanitario, además del aporte en disminución de carbono equivalente.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. [En Línea] Disponible en <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/239393/> [Accedido: 09 de Enero, 2018]
- [2] R. Campos, N. Quirós y A. Navarro. "Alternativas y acciones en el tema de residuos sólidos planteadas por las municipalidades de Jiménez y Oreamuno y su relación con el desarrollo y la sostenibilidad," *Tecnología en Marcha*, vol. 26, n.º 2, pp. 104-111, 2013.
- [3] R. Campos y S. Soto. "Análisis, de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el Cantón de Guacimo, Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 1, pp. 114-124, 2014.
- [4] R. Campos, L. Brenes y M. Jiménez. "Evaluación de métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras," *Tecnología en Marcha*, Encuentro de Investigación y Extensión, pp. 25-32, 2016.
- [5] Asamblea Legislativa de Costa Rica, "Ley para la gestión integral de residuos sólidos," San Jose, 2010.
- [6] M. Rodríguez, J. Venegas, M. Angoa y J. Montañez. "Extracción secuencial y caracterización fisicoquímica de ácidos húmicos en diferentes compost y el efecto sobre trigo," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 1, n.º 2, 2010
- [7] P. Román, M. Martínez y A. Pantoja, "Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina," Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013.
- [8] M. Bueno, "Cómo hacer un buen compost. Manual para horticultores ecológicos," *Navarra, España, 2010*.
- [9] Grupo de Investigación de Compostaje, "Parameters affecting the composting process," Universitat Autònoma de Barcelona, [En Línea] Disponible en <http://www.gicom.cat/parameters-affecting-the-composting-process/> [Accedido el 20 de noviembre del 2017]
- [10] F. Ramírez, R. Campos, M. Jiménez y L. Brenes. "Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guacimo, Limón, Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, Encuentro de Investigación y Extensión, pp. 14-24, 2016.
- [11]. M. Alcolea y C. González, "Manual de Compostaje Doméstico," Barcelona, 2010.
- [12] G. Borrero, F. Pacheco, D. Arias, y R. Campos, "Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico: Variables físicas, químicas y biológicas en el proceso de compostaje", *VI Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos Sólidos: Hacia la Carbono Neutralidad 2021. CYTED*. ISBN: 978-9968-641-28-9. Pp. 522-528, 2015.
- [13] A. Fernández, "360 soluciones verdes," [En Línea] Disponible en <http://www.360solucionesverdes.com/composteras-organicas/pellets> [Accedido el 4 de diciembre del 2017]
- [14] J. Arrigoni, "Evaluación del Desempeño de diferentes Prototipos de composteras en el tratamiento de residuos orgánicos," M. S. Thesis, Universidad Nacional del Comahue, Argentina, 2011.
- [15] G. Soto y G. Meléndez, "Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos," *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, n.º 72, pp. 91-97, 2004.
- [16] M. Soliva y M. López, "Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso," *Escuela Superior de Agricultura, Barcelona, España, 2004*.
- [17] L. Brenes, M. Jiménez, R. Campos y M. Gamboa. "Entender las pérdidas de alimentos para actuar sobre la gestión de residuos desde la minimización," Libro de actas. VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. Universidad de Cantabria, Santander. ISBN: 978-84-697-3824-5. Pp. 762, 2017.
- [18] V. Bravo, "Introducción a los impactos ambientales sobre los recursos naturales," Departamento de Economía Energética, Argentina, 2015.

A Multi-Agent System Framework for Miniaturized Satellite

Plataforma de desarrollo software basado en agentes para sistemas satelitales miniaturizados¹

Carmen Chan-Zheng², Johan Carvajal-Godínez³

Fecha de recepción: 7 de abril de 2018
Fecha de aprobación: 8 de julio de 2018

Chan-Zheng, C; Carvajal-Godínez, J. A Multi-Agent System Framework for Miniaturized Satellite. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 54-67.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4118>

¹ Work based on Thesis work of [19].

² Universidad de Costa Rica. Puntarenas, Costa Rica. Correo electrónico: carmen.chan@ucr.ac.cr

³ Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: johncarvajal@tec.ac.cr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1489-7894>



Keywords

MAS engineering; framework; embedded systems; real-time; agent; multi-agent

Abstract

Developing newer satellite missions faces increased onboard software complexity. Next generations of small satellites need to enable the infrastructure for implementation of concurrent and deterministic onboard algorithms for mission coordination and control. Multi-agent-based architectures are a new developing approach adopted in the software engineering field due to its flexibility, scalability, and adaptability to dynamic operating environments. This paper describes the design and implementation of a deterministic multi-agent system framework to develop applications for highly constrained embedded computers used in small satellite missions. As a result of the implementation of this framework the user coding effort for describing complex onboard software applications is reduced up to 50% with minimum impact on CPU load and program memory allocation. This paper also shows a set of benchmarks that demonstrate not only the feasibility of MAS-based software for small satellite missions but its value to achieve aggressive development schedules.

Palabras clave

Sistema multiagente; sistema embebidos; agente; tiempo real; multi-agente.

Resumen

El desarrollo de nuevas misiones satelitales se enfrenta a un incremento en la complejidad del software a bordo. Las próximas generaciones de satélites pequeños deben habilitar la infraestructura para la implementación de algoritmos a bordo concurrentes y deterministas para la coordinación y el control de la misión. Las arquitecturas basadas en multi agentes son un nuevo enfoque de desarrollo adoptado en el campo de la ingeniería de software debido a su flexibilidad, escalabilidad y adaptabilidad a entornos operativos dinámicos. Este artículo describe el diseño y la implementación de un *framework* basado en sistemas multi-agentes para desarrollar aplicaciones para computadoras embebidos con recursos altamente limitados que son utilizadas en pequeñas misiones satelitales. Como resultado de la implementación de este *framework*, el esfuerzo de codificación del usuario para escribir aplicaciones complejas de software a bordo se reduce hasta en un 50% con un impacto mínimo en la carga de la CPU y la asignación de la memoria del programa. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran no solo la viabilidad del software basado en MAS para misiones de satélites pequeños, sino también su valor para lograr planeamientos agresivos.

Introduction

Embedded computers are the core of any electronic system, and satellites are not the exception. In fact, satellite designers are adopting the use of distributed spacecraft architectures to improve their performance and making their subsystem's integration easier and faster. The shift from a centralized computing architecture towards a distributed architecture offers new advantages. For example, it improves fault-tolerant capabilities by enabling resource sharing among subsystems [1]. Also, it is easier to reconfigure and to upgrade the onboard software on the fly, which brings flexibility in the mission operations [2] [3]. However, these new advantages come at a cost: the onboard software complexity of the space missions is increased. According to [4], the primary

cause of the growth in satellite software complexity comes from the mission requirements related to coordination and control-related tasks during the mission operation phase.

Both coordination and control activities demand a deterministic (real-time) behavior to the computers onboard of the satellites. This onboard software is characterized by being autonomous. Thus, it can make decisions without human intervention with specific time constraints. In particular, spacecraft maneuvers and fault detection, identification and recovery tasks are the most critical features needed to ensure the safety of the spacecraft [5] [6]. As the onboard coordination and control activities require a high degree of autonomy, the use of Multi-Agent Systems (MAS) is proposed as a software architecture style to develop satellite software with intelligent capabilities [7]. The critical feature of this architectural style lies in its capacity for addressing problems by distributing them to different agents [8]. According to [9], an *agent* is an autonomous computational entity that is assigned to a specific role within the system, communicates with other agents and perceives their environment. A group of agents (MAS) work in a proactive sense to achieve a specific mission goal.

In general, most of the MAS-based applications do not use a standard platform or framework for its implementation [10]. However, there are several solutions available for MAS-based applications development. Some of them are based on the specifications established by The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA), for instance, JADE [11], SPADE [12], and Mobile-C [13]. The main advantage of being a FIPA-compliant platform/framework is the ability of applications interoperability among different platform/frameworks.

There are also other successful MAS-based non-FIPA compliant frameworks designs such BESA-ME [14], EmSBot [15] and ObjectAgent [3] that enable the implementation of embedded MAS-based software.

Despite that JADE is the most used MAS-based application development platform [16] and the JADE agent platform runtime's memory footprint is around 100kb (making it suitable for embedded devices) [17], it does not fulfil the real-time requirements of the spacecraft system. Similarly, SPADE does not offer real-time support either. Moreover, Mobile-C framework runs on OSs that are not suitable for highly-constrained embedded platforms.

Lastly, the above-mentioned non-FIPA compliant frameworks (BESA-ME, EmSBot and ObjectAgent), although successfully implemented, they do not discuss the implementation of the minimum technology required to build a MAS-based platform specified by FIPA.

Furthermore, as shown, there are several approaches of MAS-based platform/framework/application implementations in embedded systems, but there are no reports on the literature about how the mapping methodology of an agent to a RTOS environment might affect the CPU's load, power consumption and latency.

Therefore, the purpose of this paper is to present a MAS framework that bridges the gap between real-time features and implementation based on the FIPA specifications. This framework is built based on a design strategy that considers the effect of the mapping on the CPU's load, power performance and latency of the system. Multi-Agent Framework for Embedded Systems (MAES), is a FIPA-based framework with real-time capabilities designed to be suitable for highly constrained embedded devices used in computers for pocketcube satellites.

The outline of the paper is as follows: Section 2 describes the software architectures aspects considered for the design of MAES, then Section 3 focuses on the implementation strategy, specifically in the key components to make the platform FIPA-compatible. Section 4 shows a characterization of MAES using a set of applications with different levels of complexity to show the value of adopting MAS-based software design in small satellites missions. Finally, Section 5 draws the main conclusions and discusses the future work intended.

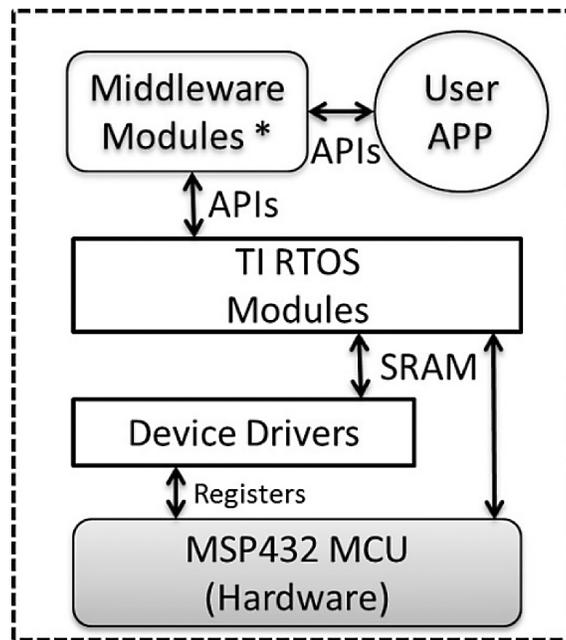


Figure 1. Onboard Software Architecture for PocketQube Computer.

MAES Architecture

The development of a multi-agent systems framework for satellite systems responds to the need of having distributed and concurrent execution environment for autonomous onboard software execution. This section starts with a description of the satellite execution infrastructure, to continue with the MAES framework design. The end goal is to show the feasibility and value of adopting multi-agent-based software development approach for satellite software development.

Satellite Software Architecture

This paper considers a highly miniaturized satellite using the pocketqube form factor. As discussed in [16], this highly integrated spacecraft, with an approximated volume of 5cm x 5cm x 15 cm, consists of a distributed electronic system with three primary embedded computers for electrical power management, for attitude determination and control and for command and data handling tasks. All these computers are based on the MSP432P401R microcontroller that features an ARM Cortex-M4 processor capable of running multi-threading applications with the TI-RTOS operating system. In principle, this tiny satellite is capable of running distributed and concurrent software for its operation.

This work assumes that satellite's onboard software (OBSW) can be modeled as a Multi-Agent System (MAS), and these agents are mapped into one of the pocketqube computers for their execution, so each of the onboard computers provides an execution platform for agents to live (logical containers). Either the agents or their private behavior functions can rely their execution on TI-RTOS threads called tasks. Also, this work takes as inputs the FIPA standards for implementing the MAS components. The software architecture model for this pocketqube mission is presented in figure 1, where the interface between different software layers is highlighted. MAES framework is implemented as a middleware module in charge of enabling the operation of the MAS based capabilities for a single pocketqube computer.

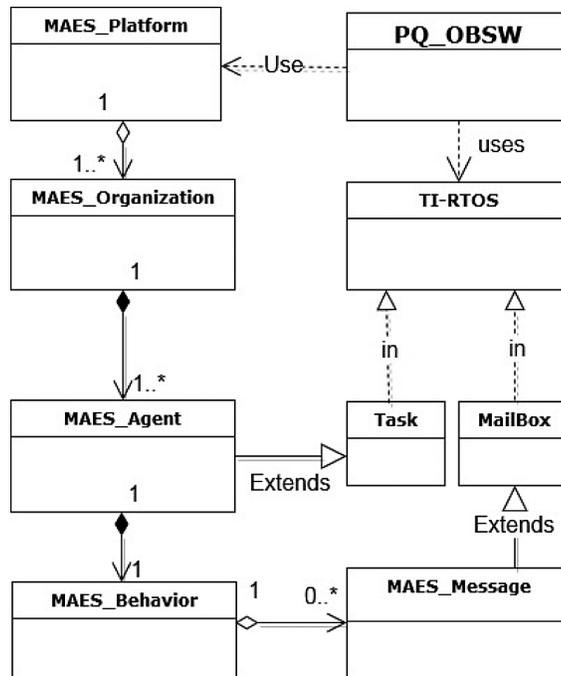


Figure 2. MAES Class Diagram.

MAES Framework Design

A set of software components were engineered using object-oriented abstractions to provide with the required FIPA-based features in MAES framework. The core of the MAES design is the agent class that is an extension of the task module in the TI-RTOS. This class allows the composition of agents with one behavior supplied by the behaviors class. These behaviors can be either generic or composed, depending on the software requirements, which provides flexibility. Agents can interact with each other by sending and receiving messages. For that purpose, agents use the mailbox module from the TI-RTOS.

Agents also can be grouped into organizations, depending on the software requirements. For that purpose, the MAES organization class provides the abstractions required for agents to organize and execution within the MAES execution platform, that aggregates all the organizations living in the execution environment. Figure 2 shows the relationship of these classes within the MAES framework. Section 3 focuses on the implementation aspects of each class and their integration.

MAES Framework Implementation

The implementation of the MAES framework was carried out using the integrated development environment (IDE) Code Composer Studio (Version: 7.1.0.00016) with the Texas Instruments Compiler (Version: TI v16.9.1 LTS) and the XDCtools (Version: 3.32.0.06_core).

The hardware platform provided for this research was the SimpleLink™ MSP432P401R LaunchPad™

Development Kit. The microcontroller used by the development board is the MSP432P401R microcontroller (ARM Cortex-M4) running at 48MHz. Additionally, a Sensors Booster Pack Plug-in Module was connected to the Launchpad. This module contains a light sensor, an infrared sensor, an Inertial Measurement Unit (IMU) (featuring an accelerometer and gyroscope), a magnetometer and an environmental sensor.

Table 1. Class implementation for MAES components.

MAES Component	MAES Class
Agent	Agent Class Generic Behavior Class Agent Organization Class
Agent Platform	Agent Platform Class
Agent Management Service	Agent Platform Class
Message Transport Service	Agent Platform Class Agent Message Class

The framework was written using C++, which is an Object-Oriented Programming (OOP) Language. Table 1 shows that each of the mandatory FIPA components is implemented accordingly through different classes provided in MAES framework.

The following subsection describes in detail the implementation of each MAES class.

Agent Class

An instance of the Agent class contains the variables that describe the Agent's AID, mailbox handle, local name, priority, and organization characteristic. The instance also has a pointer to a memory stack defined by the developer. This stack is used for storing the agent's context and variables.

Generic Behavior Class

The MAES framework provides classes that can be used by the developer to implement customized behavior. An instance of Generic Behavior class allows the user to implement one behavior for an agent. The instance contains methods that can be overwritten by the developer: setup(), action() and done(). Additionally, the developer can also overwrite methods related to Failure Detection, Identification and Recovery tasks (FDIR). The FDIR methods intend to detect faults and identify the origin of the fault in the shortest time possible. Therefore, reducing the diagnostic time and increasing the system availability [17]. With the FDIR methods, the agent autonomy and reliability are increased as it can detect, identify and recover from its failure instead of having a centralized managing authority to perform those actions. The execution flow of these methods is shown in figure 3.

To execute the methods shown in figure 3, the method executed() has to be called from a wrapper function. If required, several behaviors can be implemented as separate subroutines in the wrapper function, and its execution order is determined by the developer by using patterns such as Finite State Machines.

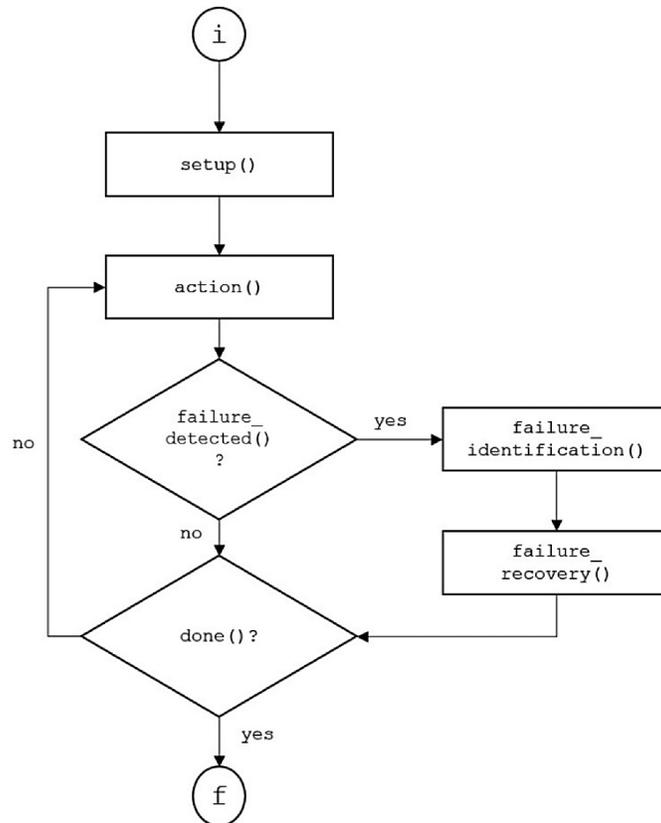


Figure 3. Generic behavior instance execution flow diagram.

Agent Organization Class

The Agent Organization class allows the developer to create organizations. Each organization groups the agents into one of the following topology types: Hierarchy and Team. The Agent Organization object contains methods such as adding an agent to the organization, banning an agent, removing an agent from the organization, among several others.

Agent Platform Class

An instance of the Agent Platform Class contains methods to initialize the constructed agents, to initialize the platform and to perform the services. Additionally, this class creates the AMS agent.

The AMS agent performs actions such as register/de-register an agent, suspend/resume an agent, kill an agent and restart an agent. The behavior of the AMS agent is shown in figure 4.

Agent Message Class

Each agent's mailbox is created in the Agent Platform class. However, the message object to be exchanged during the agent's communication is not constructed yet. Therefore, MAES framework provides a method for the message object creation and management through the Agent Message class. An instance of the Agent Message class contains the message object to be exchanged between two agents and the methods to manipulate the object. The message object contains the sender's AID, the target's AID, the message type and the message's content. Also, there are methods to manipulate the message object such as send, receive, add receivers, among others.

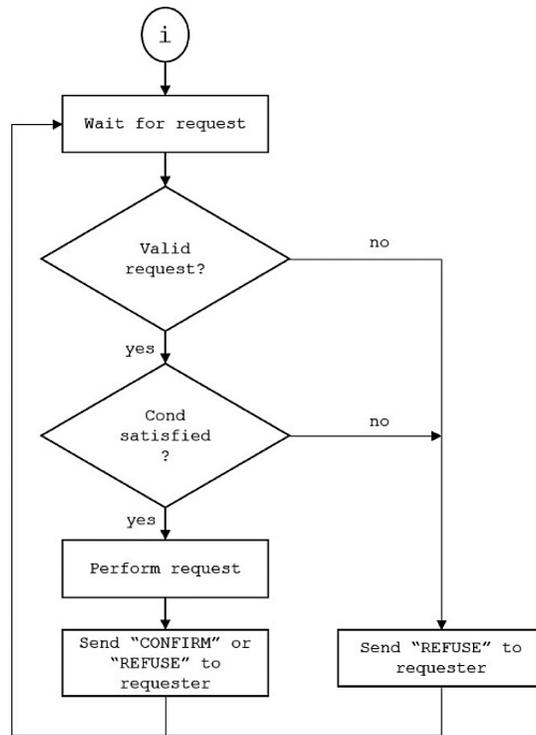


Figure 4. AMS Agent Behavior.

MAES Framework Workflow

Figure 5 shows the workflow to be followed to use the MAES framework properly. This consist of three phases namely project setup, agent construction, and platform construction. In the setup phase, all the dependencies are configured and verified in the integrated development environment. For the agent construction phase both the stack and behavior parameters are established, then during the platform construction phase, the boot agent service is instanced the application is launched by the TI-RTOS scheduler.

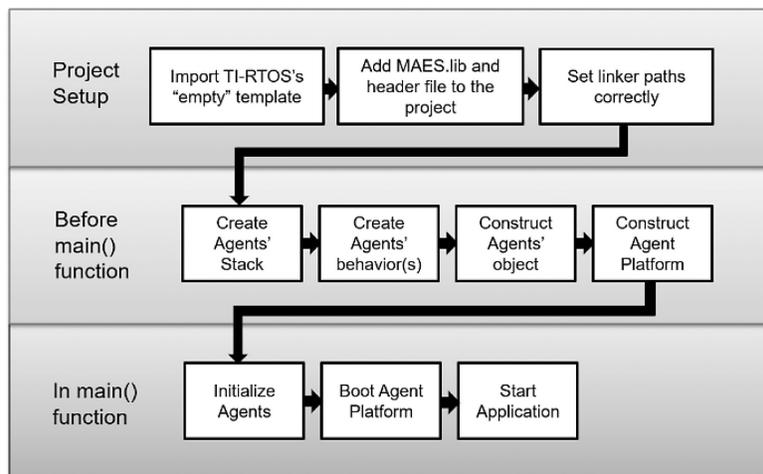


Figure 5. MAES framework Workflow Sequence.

MAES Benchmark

This section describes the experiments conducted to study the real-time characteristics and the impact on the memory allocation, CPU's load and power consumption of the MAES framework on any application. For this, four applications with a different level of complexity were used.

The following list describes the used applications, and it is ordered from the simplest to the most complex level:

1. Blink LED application: Blinks two LEDs.
2. Telemetry Logger application: Logs temperature, voltage and current value and outputs the value in UART interface.
3. Command and Data Handling System application: Receives commands from the user through UART interface and performs the according action.
4. Attitude Estimation algorithm application: Implementation of a quaternion-based Extended-Kalman Filter (EKF) based on the work of Sabatini (2006) [18].

The Attitude Estimation Algorithm was implemented in MAES and JADE framework to study the real-time characteristic of MAES framework; the JADE library was chosen for comparison purposes since it is the most common known-tool for MAS-based development.

Then, to study the impact of MAES framework on the memory, CPU's load and power consumption it was developed two versions for each of the applications: without MAES and with MAES. Each of the benchmark tests is explained in further detail in the following sections. To achieve consistency with the results, all the experiments were run on the same Launchpad board and were implemented in the same environment with the same compiling tools.

Real-time characteristics

This experiment compares the execution time of the EKF algorithm in MAES and in JADE. The execution time of the algorithm is measured each time that a new data arrives. The data is logged during 5 minutes at 10Hz sampling rate. The mean and variance of both framework's execution time are shown in table 2.

Table 2. Mean duration and variance of the execution time

	MAES Framework	JADE Framework
Min (ms)	2.564792	0.054312
Max (ms)	2.593562	64.982879
Mean (ms)	2.574432	0.182392
Variance ([ms] ²)	0.000023	2.328159

JADE's execution time varies on each call as the processor might be busy executing other system's processes. On the other hand, MAES' execution time is consistent the real-time operating system ensures predictability in its behavior. Figure 6 shows the probability density function for both frameworks.

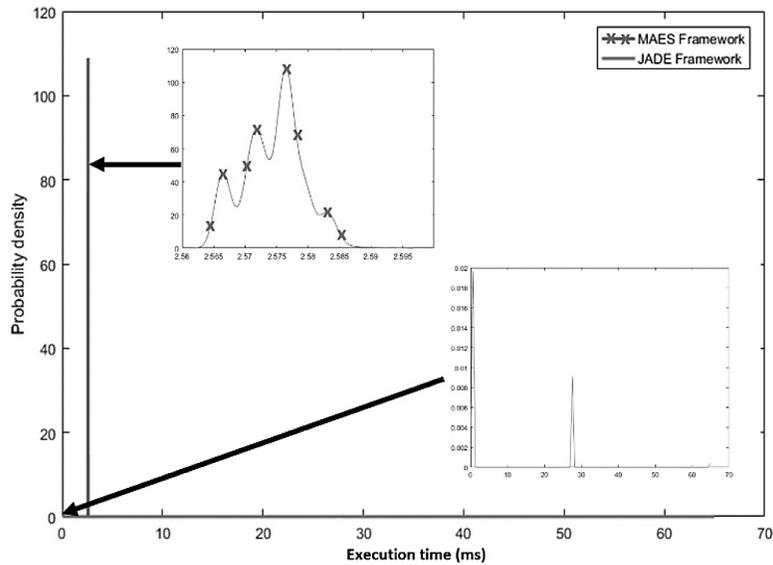


Figure 6. Probability density function comparison.

As seen, JADE’s execution time is widely spread while it is concentrated in MAES. Despite that the algorithm executes faster in JADE in average, JADE cannot guarantee that on each call the algorithm execution time will be consistent. On the other hand, the execution time in MAES is consistent as it lies on top of a real-time operating system that ensures predictable execution pattern behavior.

Memory Performance

The Launchpad includes 256KB Flash memory and 64KB SRAM memory. Figure 7 shows the memory usage for the application on both implementations.

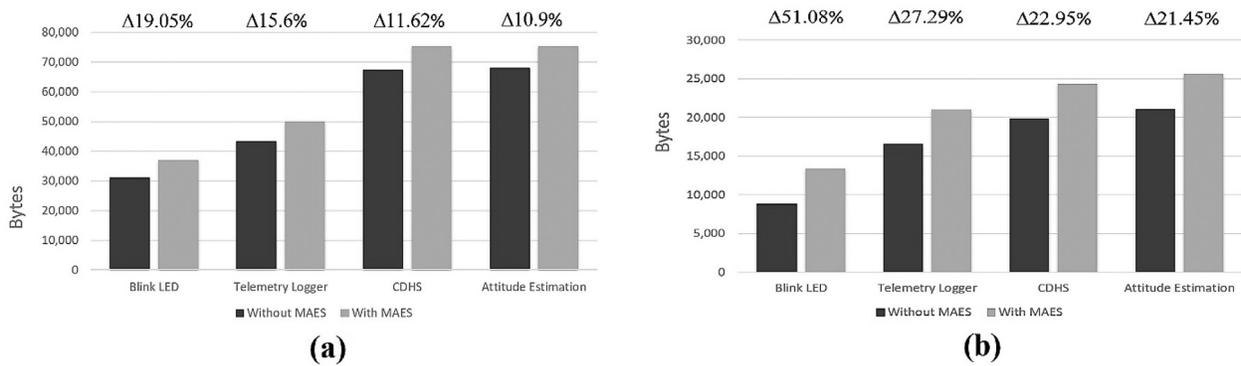


Figure 7. (a) Flash Memory allocation (b) SRAM memory allocation

For all the applications, there is an increment in memory utilization (program memory and SRAM) when using a MAES implementation. The increment in the SRAM memory is due to the dynamic object allocation of MAES framework. An Agent Platform object requires 4,400 bytes, and an additional Agent object requires 36 bytes in the dynamic memory. Then, the increment in the Flash memory is due to the additional code size of the MAES framework as shown in table 3.

Table 3. Code size characterization for each class.

Class	Size (bytes)
Agent Platform	2,364
Agent Message	1,280
Agent Organization	1,738
Agent	236
Behavior	136

It is noteworthy that the difference between the two implementations is reduced as the application's complexity increases. Therefore, the MAES framework is more suitable for the more complex application than the simple software implementations.

Even though that the memory usage is increased using MAES framework, the user coding effort is reduced as shown in table 4.

Table 4. main() function code size per application

Application	Without MAES (bytes)	With MAES (bytes)	%Decrease
Blink LED	252	120	52.39
Telemetry Logger	444	236	34.48
CDHS	344	156	46.85
Attitude Determination	232	152	54.65

The without-MAES implementation requires additional coding effort for creating tasks and signaling mechanisms. On the other hand, the with-MAES implementation already contains all the agent routines and communication method standardized for the developer use.

CPU's load

The RTOS Analyzer's Load Analysis tool from Code Composer Studio is used to measure the CPU utilization for each application in the benchmark. For that, it captures the average CPU utilization for each task/agent. According to this tool, there is an increment for all the tested applications. As an example, table 5 shows the increment for the Attitude Determination Application.

Table 5. CPU Utilization per function for the Attitude Determination

Source	Without MAES	With MAES
Kalman function	2.43%	2.44%
Sensor function	0.26%	0.28%
UART function	1.60%	2.16%

The increment of the CPU load in the MAES implementation is due to the communication method used in MAES. MAES not only implements the mailbox module but also, additional instructions are enclosed in the method send() from the Agent Message class. The additional instructions check the recipient validity. Table 6 shows the average duration for each communication method.

Table 6. Average time duration for different communication

	Average duration (ms)	Average duration (cycles)
Mailbox Post/Pend	17.412	836
MAES Post/Pend	27.375	1,314

Even though that the MAES post/pend pair is mailbox-based, this pair contains additional instructions to verify the recipient validity. Therefore, this increases the average number of cycles for the MAES communication method.

Power consumption

A set of experiments were conducted to verify the MAES's implementation impact on the power consumption. For that, the power profile from each application implemented with MAES is compared against its non-agent implementation. The results are shown in table 7.

Table 7. Mean power consumption for each application.

Application	Without MAES (mW)	With MAES (mW)	Difference
Blink Led	152.60	152.85	0.160%
Attitude Determination	149.21	149.57	0.245%
Telemetry Logger	134.17	134.18	0.004%
CDHD	158.95	160.20	0.785%

There is an increase in the power consumption for an application using the MAES implementation. The additional power consumption in the MAES framework is due to the extra CPU utilization required for the MAES' communication method as reported in Section 4.3. However, the impact of the MAES framework on the power performance was deemed negligible as the difference is lower than 1%.

Conclusions and Future Work

Conclusions

This paper has shown the feasibility of a Multi-Agent Framework for Embedded Systems (MAES) that is a FIPA-based framework with real-time capabilities designed to be suitable for highly constrained embedded devices used in highly miniaturized satellites.

The framework was developed on top of a Real-Time operating system (TI-RTOS) to guarantee determinism on agent's execution. The MAES framework's real-time characteristic was demonstrated in the benchmark analysis with an Attitude Determination application based on the Kalman filter. The experiments demonstrated that algorithm execution time in MAES is consistent with a variance in the order 10^5 s². Based on that experiment, MAES ensures predictable behavior in its execution.

Results have also shown that the user coding effort is reduced as the tasks and communication routines are standardized and encapsulated into MAES' class methods. However, it comes at a cost as the MAES-based applications show a minimum increase in memory, CPU's load, and power consumption. Furthermore, it was also shown that MAES is more suitable for more complex applications.

Even though that there is an increase in the memory allocation, it is demonstrated that the framework is lightweight as this only requires additionally 5,826 bytes in the Flash memory. Furthermore, an Agent Platform object requires 4,400 bytes, and an additional Agent object requires 36 bytes in the SRAM memory.

In conclusion, MAES is a real-time, lightweight and scalable framework compatible with highly resource-constrained embedded computers.

Future Work

Despite the MAES framework was developed based on the FIPA specifications, the framework is not fully FIPA-compliant. Specifically, the MAES framework messages are not compliant with the FIPA Agent Communication Language (ACL). Thus, it presents an implementation opportunity to expand MAES' functionality. The framework can be expanded to perform agents' inter-platform communication when FIPA ACL is integrated.

References

- [1] J. Carvajal-Godínez, J. Guo and G. Eberhard, "Agent-based algorithm for fault detection and recovery of gyroscope's drift in small satellite missions," *Acta Astronáutica*, vol. 139, pp. 181-188, 2017.
- [2] R. Radhakrishnan, W. W. Edmonson, F. Afghah, R. Martínez, F. Pinto and S. C. Burleigh, "Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2442-2473, 2016.
- [3] D. Surka, M. Brito and C. Harvey, "The real-time ObjectAgent software architecture for distributed satellite systems," in *Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings.*, Big Sky, MT, USA, USA, 2001.
- [4] D. Dvorak, "NASA Study on Flight Software Complexity," in *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Seattle, Washington, 2009.
- [5] C. Krupiarz, A. Mirantes, R. Doug, H. Adrian and W. Roger, "Flight Software," in *The International Handbook of Space Technology*, Berlin Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 471-491.
- [6] K. Schilling, "Perspectives for miniaturized, distributed, networked cooperating systems for space exploration," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 90, pp. 118-124, 2017.
- [7] C. P. Bridges and T. Vladimirova, "Agent computing applications in distributed satellite systems," in *International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, Athens, Greece, 2009.
- [8] P. Lalanda, J. A. McCann and A. Diaconescu, "Sources of Inspiration for Autonomic Computing," in *Autonomic Computing: Principles, Design and Implementation*, London, Springer London, 2013, pp. 57-94.
- [9] P. Lalanda, J. A. McCann and A. Diaconescu, "Autonomic Computing Architectures," in *Autonomic Computing: Principles, Design and Implementation*, London, Springer LONDON, 2013, pp. 95-128.
- [10] J. P. Müller and K. Fischer, "Application Impact of Multi-agent Systems and Technologies: A Survey," in *Agent-Oriented Software Engineering: Reflections on Architectures, Methodologies, Languages, and Frameworks*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 27-53.

- [11] F. Bellifemine, G. Caire, A. Poggi and G. Rimassa, "JADE: A White Paper," *EXP in search of innovation*, vol. 3, no. 3, pp. 6-19, 2003.
- [12] M. Escrivá Gregori, J. Palanca Cámara and G. Aranda Bada, "A Jabber-based Multi-agent System Platform," in *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Hakodate, Japan, 2006.
- [13] B. Chen, H. H. Cheng and J. Palen, "Mobile-C: a mobile agent platform for mobile C/C++ agents," *Software: Practice and Experience*, vol. 36, no. 15, pp. 1711-1733, 2006.
- [14] D. M. Flórez, G. A. Rodríguez, J. M. Ortiz and E. González, "BESA-ME: Framework for Robotic MultiAgent System Design," in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Multi-Agent Robotic Systems*, Angers, France, 2007.
- [15] L. Peng, F. Guan, L. Perneel, H. Fayyad-Kazan and M. Timmerman, "EmSBoT: A lightweight modular software framework for networked robotic systems," in *2016 3rd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, Beirut, Lebanon, 2016.
- [16] S. Speretta, T. Pérez-Soriano, J. Bouwmeester, J. Carvajal-Godínez, A. Menicucci, T. Watts, P. Sundaramoorthy, J. Guo and E. Gill, "Cubesats to pocketqubes: Opportunities and challenges," in *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress (IAC)*, Paris, France, 2016.
- [17] J. de Oliveira, i. da Fonseca and H. Koiti, "Fault Detection and Isolation in Inertial Measurement Units Based on -CUSUM and Wavelet Packet," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, p. 10, 2013.
- [18] A. M. Sabatini, "Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1346-1356, 2006.
- [19] C. Chan-Zheng, "MAES: A Multi-Agent Systems Framework for Embedded Systems," TU Delft, Delft, Netherlands, 2017.
- [20] A. Poggi and M. Tomaiuolo, "Integrating Peer-to-Peer and Multi-agent Technologies for the Realization of Content Sharing Applications," in *Information Retrieval and Mining in Distributed Environments*, Berlin Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 93-107.
- [21] E. Argente, J. Palanca, G. Aranda, V. Botti, V. Julian, A. García-Fornes and A. Espinosa, "Supporting Agent Organizations," in *Multi-Agent Systems and Applications*, Berlin Heidelberg, Springer, 2007, pp. 236-245.
- [22] F. L. Bellifemine, C. Giovanni and D. Greenwood, *Developing Multi-Agent Systems with JADE (Wiley Series in Agent Technology)*, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2007.

Use of pruning in the agricultural management of *Jatropha curcas* (jatropha) for the plant flower development, in Costa Rica

Uso de podas en el manejo agrícola de *Jatropha curcas* (tempate) sobre la expresión floral de la planta, en Costa Rica

Ileana Moreira-González¹, Elizabeth Arnáez-Serrano², Marvin Castillo-Ugalde³, Elemer Briceño-Elizondo⁴, Dagoberto Arias-Aguilar⁵

Fecha de recepción: 29 de setiembre de 2017
Fecha de aprobación: 2 de febrero de 2018

Moreira-González, I; Arnáez-Serrano, E; Castillo-Ugalde, M; Briceño-Elizondo, E; Arias-Aguilar, D. Use of pruning in the agricultural management of *Jatropha curcas* (jatropha) for the plant flower development, in Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 68-76.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4119>

1 Biology School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. E-mail: imoreira@tec.ac.cr

2 Biology School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. E-mail: earnaez@tec.ac.cr

3 Forest Engineering School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. E-mail: mcastillo@tec.ac.cr

4 Forest Engineering School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. E-mail: ebriceno@tec.ac.cr

5 Forest Engineering School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. E-mail: darias@tec.ac.cr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>



Keywords

Pruning; floral expression; *Jatropha curcas*; jatropha.

Abstract

The species *Jatropha curcas* (jatropha) is characteristic of the Mesoamerican region, with its center of origin found in Mexico. It has been adapted for its use as hedge rows and also exploited, based on traditional knowledge for medicinal applications. Currently, it is classified as a valuable species for the production of oils; for biofuels or as paint diluents. In Costa Rica, since 2005, studies have been performed to achieve the positive domestication for the use of this species as an agro-energetic crop along with another food crop. However, the crop management processes are still very recent and it is required to deepen in this subject to obtain a crop of a high economic value. At the Estación Fabio Baudrit, a crop was established, using seeds from the Comayagua variety and an assay was established, in which a strict assessment was performed to random blocks, of the plants length in order to execute the first prune at 40 cm. Later, the blocks were also tracked, to evaluate the branches until the flowering and harvesting stages. The yield of green fruits behaved similarly to the inflorescence and the female flower production. The pruned plants did not present a significant difference in terms of fruit yield for the first year; but in the second year, they exceeded the production of the unpruned plants.

Palabras clave

Podas; expresión floral; *Jatropha curcas*; tempate.

Resumen

La especie *Jatropha curcas* (tempate) es típica de la zona mesoamericana, su centro de origen se ha establecido en México. Ha sido domesticada para ser utilizada en el establecimiento de cercas vivas y por su valor medicinal según el conocimiento tradicional. En la actualidad se cataloga como una especie de alto valor para la producción de aceites que pueden tener uso en biocombustibles o como diluyente de pinturas. En Costa Rica desde el año 2005 se han iniciado estudios para lograr una domesticación favorable para la utilización de esta especie en cultivos agroenergéticos en alternancia con algún cultivo agroalimentario. Sin embargo, los procesos de manejo del cultivo aún son incipientes y se debe profundizar en este tema para lograr una cosecha de mayor valor económico. En la Estación Fabio Baudrit se estableció una plantación proveniente de semilla de la variedad Comayagua y se estableció un ensayo de bloques al azar a los que se le dio un seguimiento estricto en longitud para aplicar una primera poda a los 40 cm y posteriormente un seguimiento a las ramas hasta que inicie la floración y la cosecha. La producción de frutos verdes se comportó de manera similar a la producción de inflorescencias y flores femeninas. Las plantas podadas no mostraron una diferencia significativa de producción de frutos en el primer año, pero en el segundo año, superan a las plantas no podadas.

Introduction

The crops for biofuels correspond to a wide range of plant species, that present differences in terms of productivity, oil quality, adaptability to climate change, and other ecosystem benefits, such as the ability increase or keep the fixation of carbon in biomass and the soil. The energy projections for Costa Rica anticipate that the country's traditional energy sources will not be able to continue increasing after 2032. Therefore, it is necessary to promote research on plant

species such as *Jatropha curcas* (jatropha), that being a plant from Mesoamerican origins with a high quality oil, has a considerable potential in the energetic field.

In Costa Rica, the National Biofuels Programme has the overall objective of developing a biofuel industry that contributes to the energy safety and efficiency, the climate change mitigation, the reactivation of the farming sector, and the local and national socioeconomic development [12]. Their plan of action includes a proposal for an environmental sustainability model; which would allow the development of different agricultural resources for biofuel and biomass production. Therefore, the National Biofuels Programme (2008) includes a proposal of areas with farming potential for selected bioenergy crops; according to the soil type, altitude, as well as other guidelines for the linkage with industry, industrialization, commercialization, and marketing.

During the last 6 years, a multidisciplinary research group from the country's state universities has developed systematic studies on the *Jatropha curcas* (jatropha) crop [7] for its commercial use as an oil source for biofuel production.

The studies on jatropha domestication have been performed in collaboration with businessmen and farmers that have been involved in farming jatropha, used as hedge rows or for the generation of small plantations to obtain seeds. One of the main limitations at a global level is the absence of improved high-performance varieties, as well as the lack of flower synchronization and the irregular fruit production.

Globally, there is a considerable interest in jatropha (*Jatropha curcas*) as an oleaginous plant, for its use as an energy source [1] [3] [5] [8] [12], since the good oil characteristics can be exploited for biodiesel production. The oil can also be used as a baseline for soap manufacturing. Additionally, the residue for seed pressing is considered a good fertilizer and can also be used for biogas production [4]. This oleaginous plant species is characterized for its resistance to drought, it is a fast growing plant species, of easy propagation, and a short life cycle [1] [6] [7] [9]. Its yield depends on plant-associated factors such as the distribution of the dry biomass; the female/male flower proportion; the weight and size of the seeds; the oil content of the seeds; the oil quality; toxicity; flower induction; and the flower synchronization. Other factors relate to the crop site, such as the number of branches, flowers, fruits and seeds [3]. These factors are strongly influenced by the environmental and genetic effects, the adequate farming locations and the appropriate agricultural management techniques for the crop [8]. In regards to the genetic effect, the origin assays and the studies using molecular markers have shown a low genetic variability [4] [3] [11] [2]. The study aims to establish a pruning method that ensures the *Jatropha curcas* (jatropha) farmer, a potentially profitable crop.

The objective of this study is to analyze the effect of pruning as part of the agricultural management of *Jatropha curcas* on the floral expression.

Materials & Methods

The study was developed in the Estación Experimental Fabio Baudrit, found at La Garita, Alajuela, Costa Rica located at 800 msnm, starting during the month of October, 2013. The soil was mechanically prepared for farming (ploughed, raked and hilled). A total of 80 seeds for the Comayagua accession were planted, directly and with a 4 meters distance between rows and between plants. The irrigation was performed twice a week until January, 2014, and from February on, the irrigation was reduced to once a week until the end of the study. The dead plants were substituted by others, grown in the greenhouse, and which have same age. Additional jatropha plants were planted around the assay field, to eliminate the border effect. In the first development stages, a manual weeding was performed, but when the plants reached a height of 40cm, a scythe was used.

On February 2014, a bifactorial experimental design was established, with random complete blocks and 4 repetitions, and identifying each block as corresponded. Treatment 1 and 2 consisted of plants which were pruned; while treatments 3 and 4 presented unpruned *Jatropha* plants (figure 1). From that day on, the height of the plants was measured and the respective blocks were pruned when the plants reached a height of 40cm. The same was done when the branches resulting from that initial pruning reached 50cm. After that, pruning was left until after the plant's flowering and fruiting stages; when the plants received their first formation pruning, and were left with a maximum height of 1.30 m (figure 2). The number of inflorescences, female flowers, green and ripe fruits were counted; and from the harvested fruits, the number of seeds were also counted and their fresh and dried weight was also determined.

The data from the dates of the first and second semester of 2014 and 2015 presenting the highest yields of green fruit, inflorescences and female flowers was used for the analysis. The results obtained from the four treatments were evaluated though an analysis of variance (ANOVA) following a random block experimental design, in which it was evaluated whether there were any significant differences found between blocks (to discard any significance in the results due to this variable) and between treatments. When differences were found, a Tukey test with a significance of 0.05 was performed. In regards to growth, an ANOVA was performed once again for each date, to define the differentiation between treatments in terms of growth. All the statistical analysis was performed using the software STATISTICA 9.0

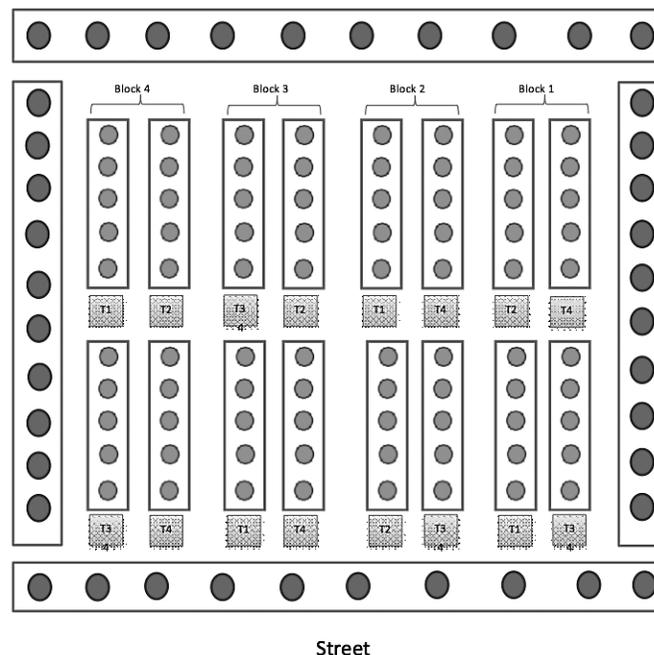


Figure 1. Design map with the distribution of the *Jatropha curcas* pruning assay.



Figure 2. Plants with their second pruning, at a plant's height of 1.30m.

Results & Discussion

The plants' growth rate was of 1 cm per week in the initial stage, with flowering occurring 7 months after planting, which was performed in November, 2013.

No significant differences were found in the growth of the jatropha plants through time; however the growth was not evaluated during 2015, since after performing the plant pruning, there is a loss in the growth rate since this plants must start their growth from the point where they were pruned (figure 3).

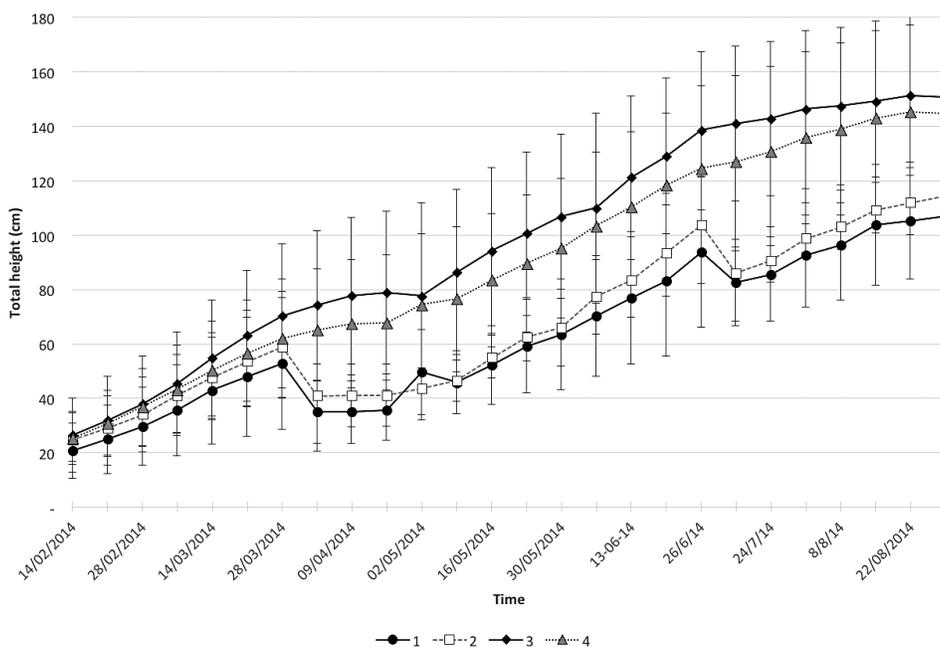


Figure 3. Average vegetative growth, considering the height of jatropha plants, during 2014

In figure 4, below it is possible to observe the average number of inflorescences per plant, according to the treatment; where during the first two harvests, Treatment 1 and 2 did not present any inflorescences, due to the fact that pruning leads to stress and the plant development focuses on branch and leaf growth, rather than generating inflorescences.

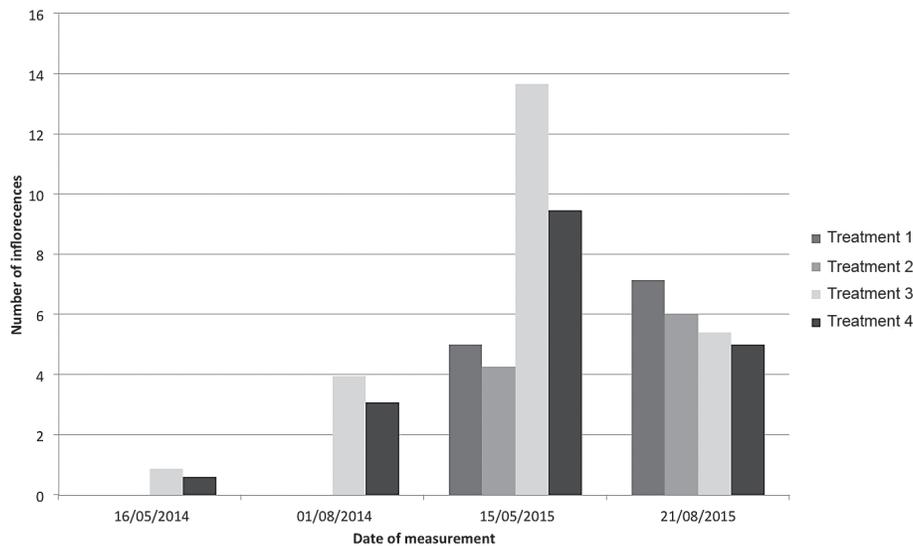


Figure 4. Average number of inflorescences according to the treatment of the pruning assay

Based on the results observed, it can be stated that the inflorescence production from May 2015 was higher than the one reported in August of the same year; but Treatment 1 and 2 increased their yield.

The analysis of variance performed with the data from the dates which presented the maximum inflorescence productivity, is shown in table 1, below.

Table 1. Analysis of variance for the inflorescence production per hectare, from the *Jatropha curcas* pruning assay.

Treatment	16/05/2014	01/08/2014	15/05/2015	21/08/2015
1	0 A (0)	0 A (0)	8000 A (1973)	11413 A (1327)
2	0 A (0)	0 A (0)	6827 A (1794)	9600 A (5431)
3	1387 B (465)	6293 B (960)	21867 A (5490)	8640 A (4049)
4	960 B (325)	4907 B (959)	15147 A (5435)	8000 A (4401)

*Treatment 1 and 2 were pruned in the first two dates, hence there is no production data. SAME LETTERS INDICATE THAT THERE ARE NO SIGNIFICANT DIFFERENCES BETWEEN TREATMENTS

The pruned plants produced very few fruits in their first harvest; however the plants from Treatments 3 and 4, which were not pruned, produced more female flowers and more fruits, since their growth was not interrupted (figure 5).

The data analysis showed that the inflorescence production only presented significant differences between treatments, and not between blocks, during the first two flowering periods (table 2). It is evident that during the first growth stages, the unpruned plants produce a greater number of inflorescences per hectare, but as the plants grow, this difference becomes less obvious. This change can be due to the fact that the plants have the required nutrients accumulated through the photosynthesis, which provide vigor to the first leaves; it was determined that on average 27 leaves per branch were sufficient for the plant to achieve the development of the first floral sprouts.

Figure 5 shows the average female flowers produced per plant, where it can also be observed that the pruned plants do not present female flowers in the first year of growth; but in the second year, there is an increase in the number and they exceed the unpruned plants.

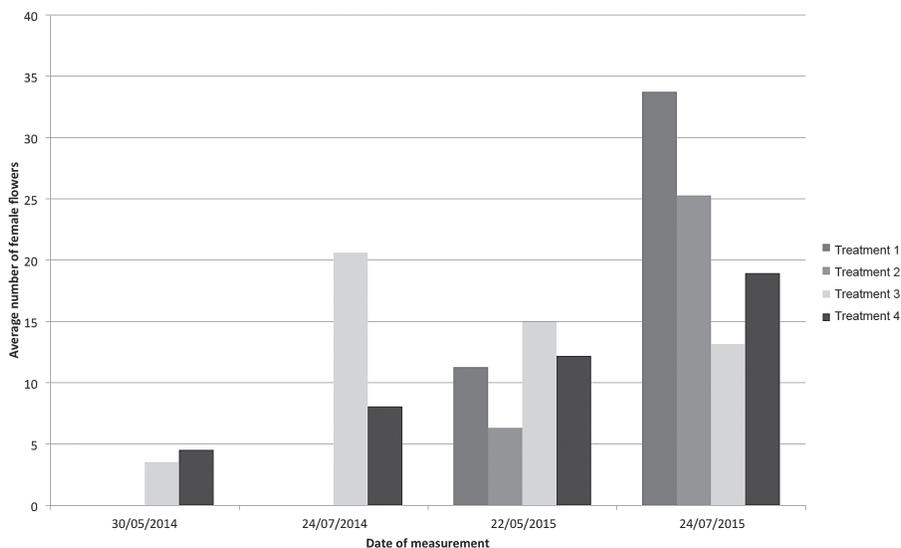


Figure 5. Average number of female flowers per treatment, during the jatropha plants pruning assay.

The behavior of the plants and their response to the treatment vary in terms of the emergence of female flowers through time; therefore, significant differences between treatments were found in the first two, as well as the last date of flowering, but not on the third date assessed, as shown table 2.

Table 2. Analysis of variance for the female flower production per hectare during the pruning assay performed to *Jatropha curcas*.

TREATMENT	30/05/2014	24/07/2014	22/05/2015	24/07/2015
1	0 A (0)	0 A (0)	18027 A (15381)	53973 A (14432)
2	0 A (0)	0 A (0)	10133 A (11535)	40427 A (12192)
3	5653 B (1771)	32960 B (4848)	24000 A (14971)	21013 B (19775)
4	7253 B (6285)	12907 B (7203)	19520 A (13918)	30293 B (15497)

Note: Same letters indicate that there are no significant differences between treatments.

The production of green fruit behaved similar to the production of inflorescences and flowers, where in the first year the pruned jatropha plants did not present a considerable fruit production, but in the second year the production was higher than that of the unpruned plants (figure 6).

In regards to the fruit production, there are significant differences found between treatments, but not between blocks (table 3). These differences vary along time, since the pruned plants response starts to be observed in the second year of growth.

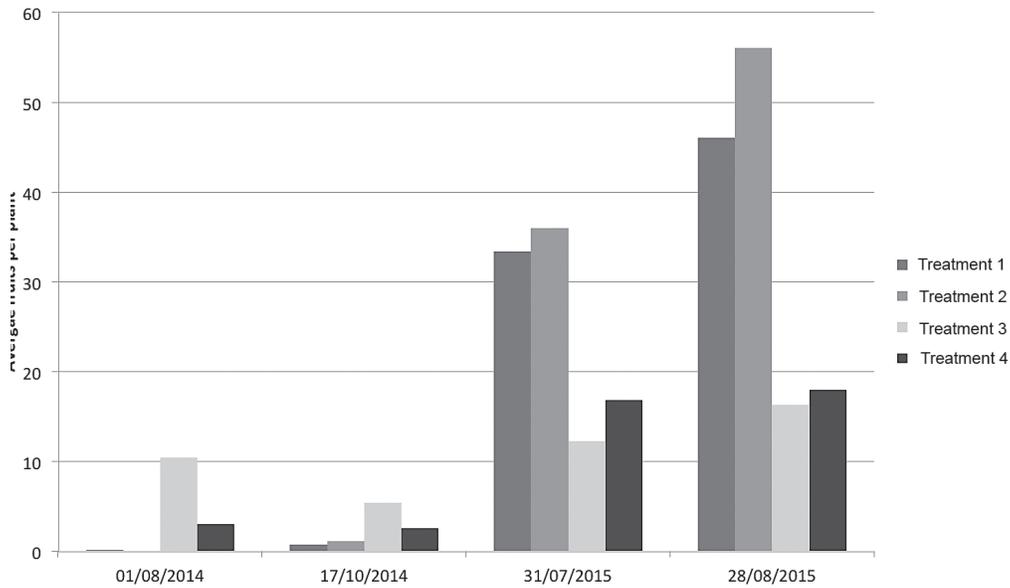


Figure 6. Average number of green fruits per treatment, for the jatropha pruning assay.

Table 3. Analysis of variance for the green fruit production per hectare in the *Jatropha curcas* pruning assay.

TREATMENT	01/08/2014	17/10/2014	31/07/2015	28/08/2015
1	213 A (106)	1173 A (1056)	53333 B (3331)	73600 B (10560)
2	0 A (0)	1706 A (1100)	57493 B (2544)	89706 B (9874)
3	16640 B (2533)	8533 B (2410)	19627 A (5049)	26027 A (4018)
4	4800 A (1056)	4053 AB (1489)	26880 A (7410)	28693 A (4104)

Note: Same letters indicate that there are no significant differences between treatments.

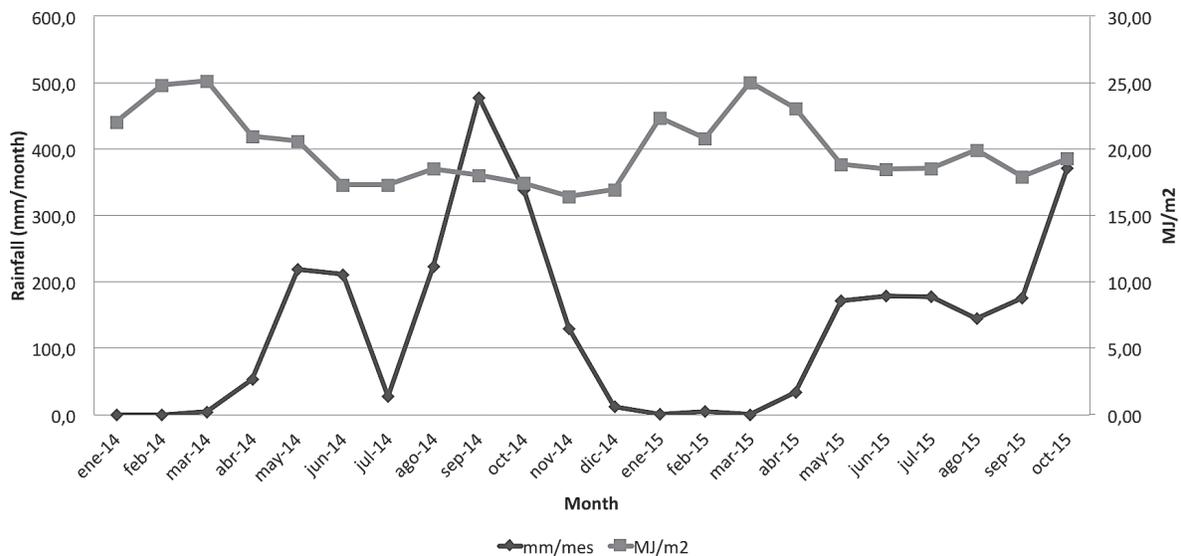


Figure 7. Mean monthly rainfall (mm/month) and average solar radiation (MJ/m²) from the meteorology station of the IMN, located at the Estación Experimental Fabio Baudrit.

Figure 7 shows the values of mean monthly rainfall (mm/month) and average solar radiation (MJ/m²), obtained from the meteorology station located at the Estación Experimental Fabio Baudrit of the Instituto Meteorológico Nacional (IMN). As it can be observed, the values of higher solar radiation occur in the months of February and March, while for 2015, these values are found during March and April. For the rainfall, a reduction was evidenced in the months of July, 2014 and on January and March of 2015; while a considerable increase in rainfall took place on September, 2014 (figure 7).

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge PhD. Charles Aker, as the general project manager, for his technical support and the arrangements in the search for external funding, with the proposal presented for Costa Rica, Mexico, Nicaragua, Colombia and Brazil, named: "Regulation of the flowering of *Jatropha curcas* to improve the sustainability of biofuel feedstock production by farmers in Latin America and the Caribbean" and approved by LAC-Brazil.

The authors would also want to express their gratitude to PhD. Werner Rodríguez, Director of the Estación Experimental Fabio Baudrit and Engineer Jesús Hernández (MAG-UCR Agreement), for their technical and logistics assistance in the execution of the assays.

References

- [1] R. Jongschaap, W. Corré y P. Bindraban, «Claims and facts on *Jatropha curcas* L., global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation programme.,» de *Plant Research International Report*, Netherlands, 2007, p. 66.
- [2] C. Yi, C. Reddy, F. Varghese, T. Bui, S. Zhang, M. Kallath, B. Kunjachan, S. Ramachandran y Y. Mong, «A new *Jatropha curcas* variety (JOS2) with Improved Seed Productivity Sustainability,» 2014, pp. 4355-4368.
- [3] J. Chikara, A. Prakash, S. Mastan y A. Ghosh, *Jatropha*, Challenges for a New Energy Crop, New York, USA: Springer Science+Business Media, 2013.
- [4] FACT, *The Jatropha Handbook: from cultivation to application.*, Eindhoven, The Netherlands: FACT Foundation, 2010.
- [5] A. King, L. Montes, J. Clarke, J. Affleck, Y. Li, H. Witsenboer, E. van der Vossen, P. van der Linde, Y. Tripathi, E. Tavares, P. Shukla, T. Rajasekaran, E. van Loo y I. Graham, Linkage mapping in the oilseed crop *Jatropha curcas* L. reveals a locus controlling the biosynthesis of phorbol esters which cause seed toxicity., *Plant Biotechnology Journal* 11, 2013.
- [6] S. Kumar y S. Singh, Variability assessment of seed traits in *Jatropha curcas* L. for improvement of oil yield, *International Journal of Genetics and Molecular Biology* 6(January), 2014.
- [7] J. Loaiza, E. Arnáez, E. Moreira, F. Herrera, A. Ureña y H. J. Guía técnica para el establecimiento y producción de *Jatropha curcas* (tempate) en Costa Rica., Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2012.
- [8] M. Martin y J. Montes, Quantitative genetic parameters of agronomic and quality traits in a global germplasm collection reveal excellent breeding perspectives for *Jatropha curcas* L., *GCB Bioenergy* 2014, 2014.
- [9] Ministerio de Agricultura y Ganadería, Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica, San José, Costa Rica.: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991.
- [10] J. Montes, F. Technow, B. Bohlinger y K. Becker, Seed quality diversity, trait associations and grouping of accessions in *Jatropha curcas* L., *Industrial Crops and Products*, 2013.
- [11] L. Montes Osorio, A. Torres Salvador, R. Jongschaap, C. Azurdia Perez, J. Berduo Sandoval, L. Trindade, R. Visser y E. van Loo, High level of molecular and phenotypic biodiversity in *Jatropha curcas* from Central America compared to Africa, Asia and South America, *BMC plant biology*, 2014.
- [12] Ministerio del Ambiente y Energía, PROGRAMA NACIONAL DE BIOCMBUSTIBLES, República de Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2008.

Establecimiento de un protocolo de transformación transitoria y estable de *Nicotiana tabacum* mediada por *Agrobacterium tumefaciens*

Establishment of a transient and stable transformation protocol of *Nicotiana tabacum* mediated by *Agrobacterium tumefaciens*

Laura Méndez-Muñoz¹, Sofia Campos-Delgado²,
Mariel Obando-Coronado³, Giovanni Garro-Monge⁴

Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2017
Fecha de aprobación: 9 de febrero de 2018

Méndez-Muñoz, L; Campos-Delgado, S; Obando-Coronado M; Garro-Monge, G. Establecimiento de un protocolo de transformación transitoria y estable de *Nicotiana tabacum* mediada por *Agrobacterium tumefaciens*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 77-91.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4120>



- 1 Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: laumendez795@gmail.com
- 2 Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: sofibd94@gmail.com
- 3 Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mariel.paola.obando@gmail.com
- 4 Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggarro@itcr.ac.cr

Palabras clave

Agroinfiltración; agroinfección; fluorescencia; BY-2; pCAMBIA 1303; acetosiringona; Higromicina; β -glucuronidasa.

Resumen

Actualmente las herramientas biotecnológicas como la ingeniería genética y la biología molecular se encuentran muy avanzadas, permitiendo el desarrollo de sistemas que se basan en el uso de células vegetales para la producción de proteínas recombinantes, lo cual permite el desarrollo de plataformas para la elaboración de biofármacos, enzimas y metabolitos secundarios. El uso de metodologías para transformación transitoria y estable, permiten la producción de proteínas recombinantes de interés. En este trabajo se realizó una transformación estable de callo de *N. tabacum* de la línea comercial BY-2 y una silvestre (T1). Además se realizaron ensayos de agroinfiltración por la técnica al vacío y con la técnica por jeringa. En ambos casos, la transformación fue mediada por *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 la cual poseía el vector pCAMBIA 1303, conteniendo los genes marcadores GFP y GUS, y un gen de resistencia a Higromicina. Se evaluó la expresión de la proteína verde fluorescente por medio de microscopía de fluorescencia. La expresión de los genes de resistencia a Higromicina y β -glucuronidasa se evaluaron por medio de PCR convencional. Se obtuvieron porcentajes de transformación aceptables, en conjunto con una alta expresión de la proteína verde fluorescente.

Keywords

Agroinfiltration; agroinfection; fluorescence; BY-2; pCAMBIA 1303; acetosyringone; hygromycin; β -glucuronidase.

Abstract

Biotechnological tools such as genetic engineering and molecular biology are very advanced, allowing the development of systems based on the use of plant cells for the production of recombinant proteins, which allows the development of platforms for biopharmaceuticals, enzymes and secondary metabolites production. Transient and stable transformation, allow production of recombinant proteins. In this work a stable transformation of *N. tabacum* callus from the BY-2 commercial line and a wild one (T1) was performed. In addition, agroinfiltration assays were carried out using two techniques: by syringe and vacuum. In both cases, the transformation was mediated by *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 which carried the vector pCAMBIA 1303, containing the GFP and GUS marker genes, and a hygromycin resistance gene. The expression of green fluorescent protein was evaluated by fluorescence microscopy. Expression of the hygromycin and β -glucuronidase resistance genes were evaluated by PCR. As a result, high GFP expression and good transformation rates were obtained.

Introducción

Durante mucho tiempo las plantas han sido usadas con fines medicinales con base en las propiedades que poseen sus diversos compuestos químicos acumulados en distintos órganos. Actualmente la ingeniería genética de plantas, ha desarrollado sistemas que se basan en el uso de células vegetales para la producción de proteínas recombinantes, lo cual permite el desarrollo de plataformas para la elaboración de biofármacos, enzimas y metabolitos secundarios. Las tecnologías establecidas de producción de biofármacos se basan en su mayoría en la utilización

de bacterias, levaduras y células animales, sin embargo, el uso de células vegetales presenta ciertas ventajas con respecto a los organismos usados hasta ahora, por ejemplo ausencia de patógenos humanos, secuencias de ADN oncogénico, priones y endotoxinas [1].

En cuanto a la transformación estable, Navarre y colaboradores [2], apuntan que las células de *Nicotiana tabacum*, en particular la línea BY-2, son las células más utilizadas para expresión de proteínas recombinantes, esto gracias a su rápido crecimiento, alta densidad y que son aptas para la transformación genética mediada por *A. tumefaciens*. En *Nicotiana sp.*, el proceso de formación de callo ha sido esencial para el estudio morfológico y comprensión del comportamiento de las células, aparte de su importancia en el desarrollo de poblaciones clonales, propagación masiva de plantas y manipulación genética [3].

La agroinfiltración es un proceso en el cual se rellena el espacio intercelular de la hoja con una suspensión de la bacteria que contiene el plásmido de interés [4]. Los ensayos de agroinfiltración comúnmente se llevan a cabo usando *N. tabacum*, debido a que sus hojas son fáciles de infiltrar y manipular, y además porque *A. tumefaciens* no tiene ningún efecto visible en la salud de la planta, a diferencia de plantas como el tomate (*Solanum lycopersicum*) y *Arabidopsis thaliana*, en las cuales se produce una necrosis al realizar la agroinfiltración [5]. Con esta técnica se busca lograr una expresión transitoria del gen de interés ya sea para estudios proteicos o para producción de proteínas a gran escala con fines comerciales.

Por otra parte, *Agrobacterium tumefaciens* posee ciertas características que la convierten en un organismo ideal para la introducción de genes foráneos a células vegetales, una de ellas es su capacidad para transferir la región T-DNA del plásmido Ti a la planta. Por lo tanto realizando intervenciones con técnicas biotecnológicas, es posible cambiar esa región del plásmido por una que contenga la secuencia de un gen de interés. Esta es la razón por la cual este plásmido, es el vector más utilizado para introducción de genes foráneos a las plantas [6].

Con el fin de establecer un protocolo de transformación estable y transitoria de forma que esté disponible para próximas investigaciones relacionadas con obtención de proteínas recombinantes en células vegetales de *Nicotiana tabacum*, se realizaron diferentes metodologías de transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens* LBA 4404.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se realizó en el Centro de Investigación de Biotecnología (CIB) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en Cartago, Costa Rica. Se empleó material vegetal (callos y plantas) previamente establecido en el CIB y además se utilizó la línea celular de BY-2 la cual fue facilitada por Centro Nacional de Innovaciones en Biotecnológicas (CENIBiot). La cepa bacteriana utilizada en el proyecto es *A. tumefaciens* LBA 4404, suministrada por el Dr. Andrés Gatica, investigador de la Escuela de Biología de la Universidad de Costa Rica. El plásmido que se utilizó para la transformación de la cepa fue pCAMBIA 1303, proveniente de *E. coli*, el cual posee regiones que codifican para GFP, GUS, resistencia a higromicina y resistencia a kanamicina.

Establecimiento del material vegetal in vitro

Introducción de semillas y micropropagación de N. tabacum L

Para obtener plantas *in vitro* de *N. tabacum* L se tomaron semillas en una gasa y se procedió a desinfectarlas con una solución de Agrimycin® y Benlate® (5 g L⁻¹) durante 30 minutos en constante agitación. Se le realizaron tres lavados con agua destilada estéril antes de colocar las semillas en una solución del 60% v/v de hipoclorito de sodio (3.5% i.a.). El material fue llevado

a cámara de flujo laminar donde se hicieron nuevamente tres lavados con agua destilada estéril previo a ser colocadas en una solución del producto comercial Zeritol® al 15% por 3 minutos y seguidamente las semillas se colocaron en alcohol al 70% por 1 minuto. Las semillas se lavaron tres veces en agua destilada estéril antes de cultivarlas en medio MS al 100% de sales y fueron llevadas al cuarto de crecimiento a una temperatura de $25^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$, un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad y una luminosidad de 2000 lux. Una vez que las vitroplantas alcanzaron buen tamaño, se subcultivaron en medio MS [7] al 100% de sales.

Inducción de callogénesis y mantenimiento

Se siguió la metodología descrita por Ali y colaboradores [3], para lo cual se utilizaron explantes foliares de 1 cm^2 de las vitroplantas obtenidas de *Nicotiana tabacum* L. en medio semisólido MS 100% (Murashigue y Skoog, 1962) al 3% m/v de sacarosa y suplementado con 2 mg L^{-1} de Ácido Naftalenacético (ANA) y $0,2\text{ mg L}^{-1}$ de 6-bencilaminopurina (BAP) como reguladores de crecimiento. Los explantes se cultivaron en condiciones de oscuridad a una temperatura de $25^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ según lo indicado por Santos y colaboradores [8]. El subcultivo del material de callo se realizó en medio de cultivo con las mismas concentraciones de ANA y BAP. Por su parte el subcultivo de la línea celular de callo de tabaco BY-2 se realizó cada 5 semanas en medio de cultivo MSBY.

Pruebas de viabilidad de los callos con TTC

Para este ensayo se tomaron tres segmentos de callo de 1 cm^2 aproximadamente de la línea T1 y BY-2 y se colocaron en un vial por separado. Se añadió solución de TTC (Cloruro de trifeniltetrazolio) al 1% hasta cubrir los segmentos de callo. Cada vial se incubó a 37°C por 36 horas. Para cada línea de callo el ensayo se realizó por duplicado.

Ensayos de sensibilidad

Se evaluó la sensibilidad de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* y de las células vegetales (callos de líneas celulares T₁ y BY-2 y segmentos de planta) ante los antibióticos Higromicina B y Ceftriaxona (Axtar®), con el fin de obtener la concentración adecuada para ser utilizados como agentes selectivos durante el ensayo de la transformación genética [9].

Preparación de *A. tumefaciens* LBA 4404

Se creció la bacteria *A. tumefaciens* LBA 4404 transformada con el vector pCAMBIA 1303 en un medio LB líquido suplementado con 50 mg L^{-1} de kanamicina, rifampicina, y de acetosiringona. Las condiciones de crecimiento proporcionadas fueron una temperatura $25^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y 150 rpm de agitación. La OD_{600} utilizada fue 0.5 - 0.6.

Ensayo de transformación estable

*Transformación de los callos de *N. tabacum**

De cada línea celular se tomaron 50 callos de aproximadamente de 1 cm^2 y se colocaron en placas Petri estériles (10 callos por placa) con 20 mL de la suspensión bacteriana de *A. tumefaciens* LBA 4404 transformada previamente preparada. Para cada línea de callo se establecieron dos tratamientos donde se evaluaron diferentes tiempos de transformación de 15 (T1 15m y BY-2 15m) y 30 minutos (T1 30m y BY-2 30m). Todos los tratamientos se agitaron de forma orbital durante la transformación. Una vez transcurrido el tiempo se eliminó el exceso de bacteria colocando los callos en un papel filtro estéril [9].

Co-cultivo y selección de callos transformados

Los callos se cultivaron en placas Petri con medio (MSBY y T1) suplementado con 50 mgL⁻¹ de acetosiringona durante 48 horas que corresponde al tiempo de co-cultivo, en condiciones de oscuridad a 25° ± 2°C. Se colocaron 4 callos por placa [9]. Luego del co-cultivo, los mismos se subcultivaron en medio suplementado con Higromicina B y Ceftriaxona.

Ensayo de transformación transitoria

Agroinfiltración al vacío y con jeringa

Para realizar la agroinfiltración al vacío se tomó como base la metodología propuesta por Medrano y colaboradores [9]. Primeramente se cortaron las hojas de las plantas de *N. tabacum* y colocaron en una placa conteniendo solución bacteriana (aproximadamente 3 hojas por placa), con el envés de la hoja en contacto con la solución. Seguidamente se colocaron dichas placas en un desecador al vacío y se procedió a sellarlo adecuadamente. A continuación se aplicó vacío durante 40 segundos a una presión de 20 in.Hg y luego se soltó rápidamente el vacío.

En la agroinfiltración con jeringa primeramente se cortaron las hojas de las plantas de *N. tabacum* y se procedió a realizar una herida superficial (con ayuda de una aguja) en la parte abaxial de la hoja. Seguidamente, con una jeringa (sin aguja) conteniendo la solución bacteriana se forzó la entrada de la misma empujando suavemente el pistón de forma que se mantuvo una presión uniforme durante la infiltración del tejido. Una misma hoja se agroinfiltró en varios puntos.

En ambos casos se eliminó el exceso de bacteria y se colocaron en placas con medio MS 100% [7], al 3% m/v de sacarosa, suplementado con ceftriaxona.

Evaluación de la expresión estable/transitoria de los genes bajo estudio

PCR para los genes GUS y resistencia a Higromicina

Para el análisis de los callos, se tomó una muestra de cada una de los tratamientos y cada uno de los controles, las mismas se llevaron liofilizar para extraer ADN genómico. De igual forma las muestras tomadas fueron luego de 10 semanas desde que se establecieron los ensayos. Se utilizó el Kit de extracción Wizard® Genomic DNA Purification Kit, de la casa comercial Promega. Se cuantificó el ADN utilizando el Nanodrop para emplear el ADN en una PCR para amplificar el gen de resistencia a Higromicina (htp 400pb) y el gen GUS (677 pb), para lo cual se utilizaron los imprimadores htp (HF-5'-GATGTTGGCGACCTCGTATT-3'; y HR-5'-GTGTCACGTTGCAAGACCTG3') y GUS (GF-5'-TAGAGATAACCTTCACCCGG-3'; y GR-5'-CGCGAAACTGTGGAATTGA-3' Los productos de PCR fueron analizados mediante una electroforesis en gel de agarosa al 1.5% [9].

Observación bajo microscopio de fluorescencia

Para verificar si la proteína de interés (GFP) estaba presente, se realizó una detección visual de la fluorescencia de GFP utilizando el microscopio de fluorescencia que se encuentra en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos Animales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, modelo Olympus BH2-RFL-T3.

Resultados

Establecimiento del material vegetal in vitro

Introducción de semillas y micropropagación de N. tabacum L

Luego de 2 semanas se evaluó la introducción donde se obtuvo un porcentaje de germinación del 100%. Las plántulas alcanzaron un tamaño apropiado para ser subcultivadas luego de 5 a 6 semanas. No se observó contaminación del cultivo por hongos o bacterias. La figura 1 muestra las vitroplantas obtenidas después de 2 y 4 semanas desde su introducción y subcultivo.

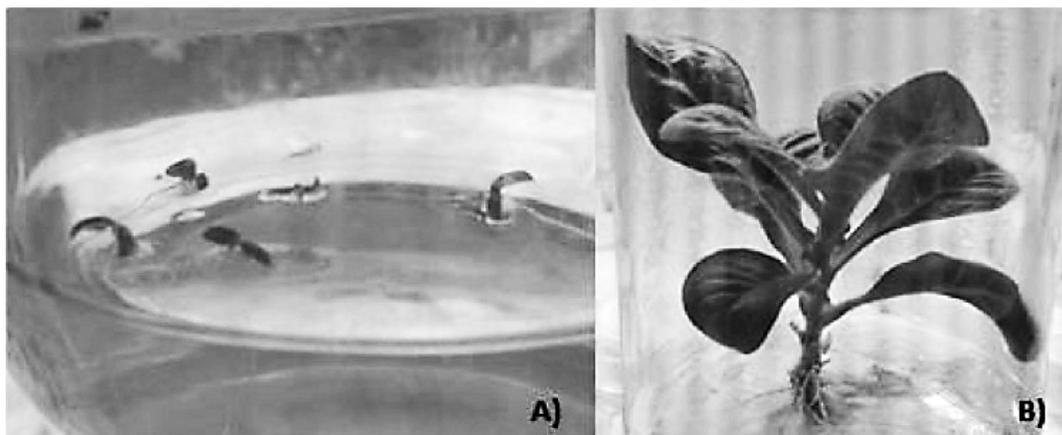


Figura 1. Vitroplantas de *Nicotiana tabacum* L después de 2 (A) y 4 (B) semanas desde su introducción y multiplicación respectivamente.

Inducción de callogénesis y mantenimiento

La figura 2 muestra el proceso de formación de callo a partir de tejido foliar de *N. tabacum* L., luego de una y dos semanas de su inducción, sin embargo, fue luego de 4 semanas que se observó la formación de callo completa. La frecuencia de formación para el callo T₁ (*Nicotiana tabacum* L.) fue del 100%, sin embargo, se dio la formación de raíces, las cuales se eliminaron en posteriores subcultivos. El callo obtenido poseía una textura suave y friable, y su coloración fue blanca-amarilla.



Figura 2. (A) Explante foliar de *N. tabacum* después de una y tres (B) semanas de inducción. (C) Callo obtenido luego de un subcultivo de cuatro semanas.

Pruebas de viabilidad de los callos con TTC

Luego de las 36 horas de incubación, se obtuvo coloración roja en todos los segmentos de callo que se sometieron a la prueba, tanto para la línea BY-2 como para la línea T1. La coloración roja o rosada indica la transformación del TTC (2, 3, 5- cloruro de trifenil tetrazolio) a formazán por parte de las deshidrogenasas [11].

Ensayos de sensibilidad

La concentración más baja de Higromicina B que inhibió el crecimiento de los callos para la línea BY-2 fue de 100 mgL^{-1} , por lo tanto ésta fue la concentración utilizada durante el proceso de selección de los callos transformados. Por otra parte la selección de los callos para la línea T₁ fue de 50 mgL^{-1} . Con respecto a sensibilidad a ceftriaxona, los ensayos permitieron determinar que para el caso de los callos 600 mgL^{-1} fue la concentración más adecuada para no dañar las células vegetales. En el caso de las hojas para agroinfiltración, la concentración más adecuada fue 700 mgL^{-1} .

Ensayo de transformación estable

Luego de que se transcurrió el tiempo de co-cultivo, el crecimiento y desarrollo de los callos transformados, ambos tratamientos de cada línea celular fueron comparados visualmente con los tratamientos control. Luego de 1 semana, fue posible observar que los callos (de la línea T₁) se tornaron oscuros gradualmente. La necrosis u oscurecimiento se observó tanto en los tratamientos T₁ 15m y 30m como para los tratamientos control en medio de selección (figura 3). Con respecto a los callos de la línea BY-2, no se mostró un cambio que permitiera evidenciar la transformación de estos callos. Por lo que se cultivaron los callos en medio con 200 mgL^{-1} con el fin de que la selección fuera más agresiva, sin embargo luego de 4 semanas, tal como se muestra en la figura 4 no se obtuvo más que cambio de color (marrón).

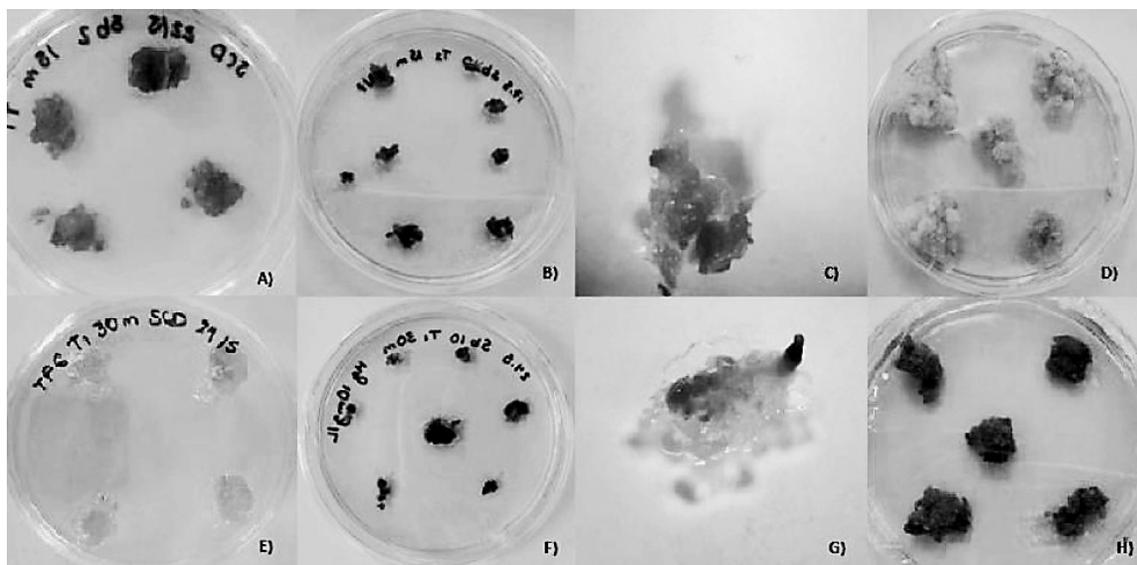


Figura 3. Proceso de selección de callos transformados de la línea T1 de los tratamientos 15m y 30m A) Tratamiento T1 15m luego de 2 semanas de establecido B) Separación de callos T1 15m cultivados en medio de selección ($10 \text{ mgL}^{-1} \text{ Hg}$) C) Callo (T1 15m) observado bajo el estereoscopio (10X) D) Control callo sin transformar en medio de selección E) Tratamiento T1 30m luego de 2 semanas de establecido F) Separación de callos T1 30m cultivados en medio de selección ($10 \text{ mgL}^{-1} \text{ Hg}$) G) Callo (T1 30m) observado bajo el estereoscopio (10X) H) Control callo sin transformar en medio de selección.

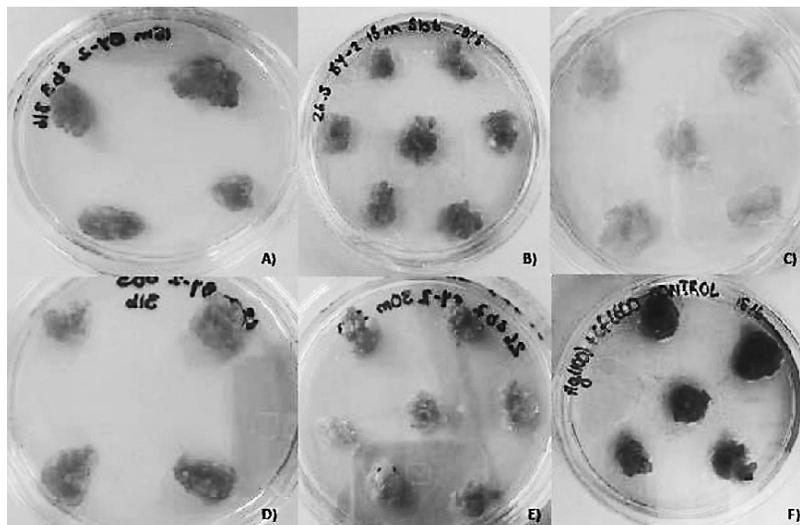


Figura 4. Proceso de selección de callos transformados de la línea BY-2 de los tratamientos 15m y 30m A)

Tratamiento BY-2 15m luego de 2 semanas de establecido. B) Separación de callos BY-2 15m cultivados en medio de selección (200 mgL-1 Hg) C) Control callo sin transformar en medio sin selección. D) Tratamiento BY-2 30m luego de 2 semanas de establecido. E) Separación de callos BY-2 30m cultivados en medio de selección (200 mgL-1 Hg) F) Control callo sin transformar en medio de selección.

Observación bajo microscopio de fluorescencia

A partir de los posibles callos transformados, se prepararon muestras para ser observados bajo el microscopio de fluorescencia. Se observó fluorescencia débil para los tratamientos controles (no transformados), mientras que para los callos transformados sí se observó fluorescencia más intensa (figura 5).

En el caso de los ensayos de agroinfiltración al vacío (figura 6) y por jeringa (figura 7), fue posible observar fluorescencia en sistema vascular, estomas y tricomas principalmente, mientras que en el ensayo control (figura 8) se observaron estomas, tricomas y sistema vascular que emitían muy poca o ninguna fluorescencia.

PCR para los genes GUS y resistencia a Higromicina

El siguiente cuadro muestra la cuantificación del ADN extraído de cada uno de las muestras a analizar, donde se obtuvieron concentraciones adecuadas (cuadro 1.), sin embargo se considera que la integridad del ADN fue baja. Por otra parte, los valores obtenidos con respecto a la absorbancia A260/A280 no indican alta pureza, sin embargo se emplearon para realizar la PCR.

La PCR se realizó utilizando primers específicos para detectar los genes *hpt* y GUS. Los productos de PCR a la hora de que se realizó la electroforesis, mostraron ser positivos, debido a que se logró amplificar el gen de resistencia a Higromicina (*hpt* 400pb) para todos los tratamientos de callos transformados (T1 15 m, T1 30 m, BY-2 15m, y BY-2 30m). Los controles de línea BY-2 mostraron ser negativos, sin embargo los controles para la línea T1 fueron positivos para este gen, lo cual no se esperaba (figura 9.). De igual forma sucedió para el gen GUS (677 pb), en donde se observa el amplicón para todos los tratamientos, excepto para el BY-2 15m. Además, los controles muestran nuevamente ser negativos para la línea BY-2, pero no así para los de la línea T1. De tal manera, que se logró confirmar molecularmente la integración de los genes del vector en el ADN nuclear del callo transformado de la línea BY-2.

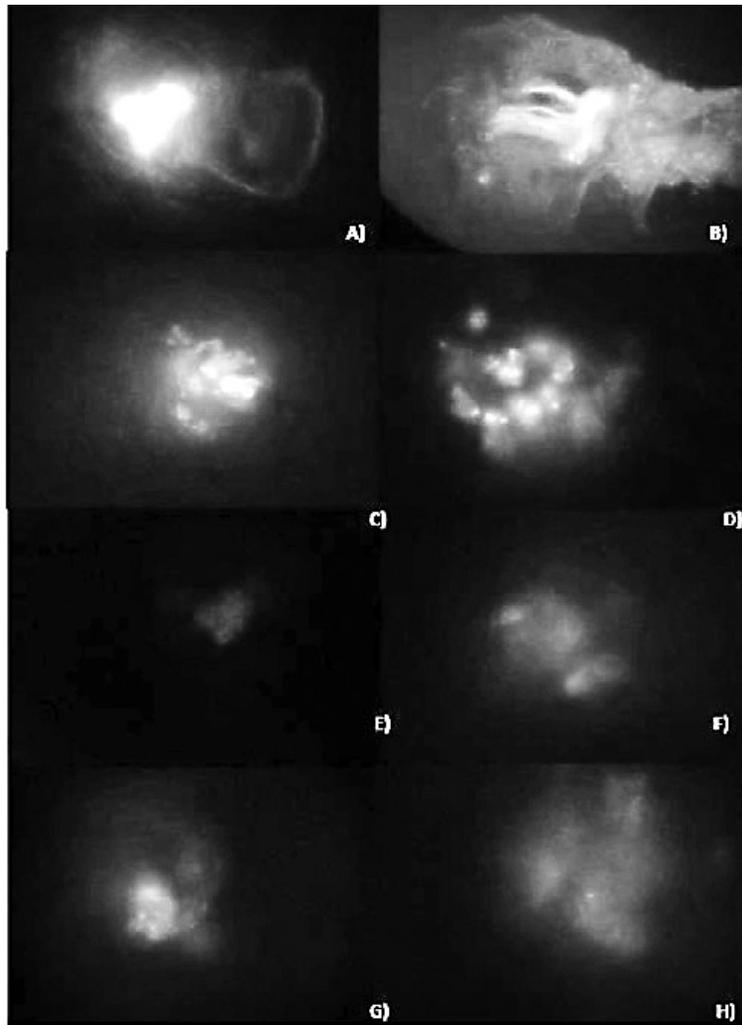


Figura 5. Expresión de GFP en callo transformado observado bajo microscopio de fluorescencia para los tratamientos A) T1 15 m B) T1 30 m C) BY-2 15m D) BY-2 30m E) Control T1 en medio de selección F) Control T1 en medio sin selección G) BY-2 en medio de selección H) BY-2 en medio sin selección.

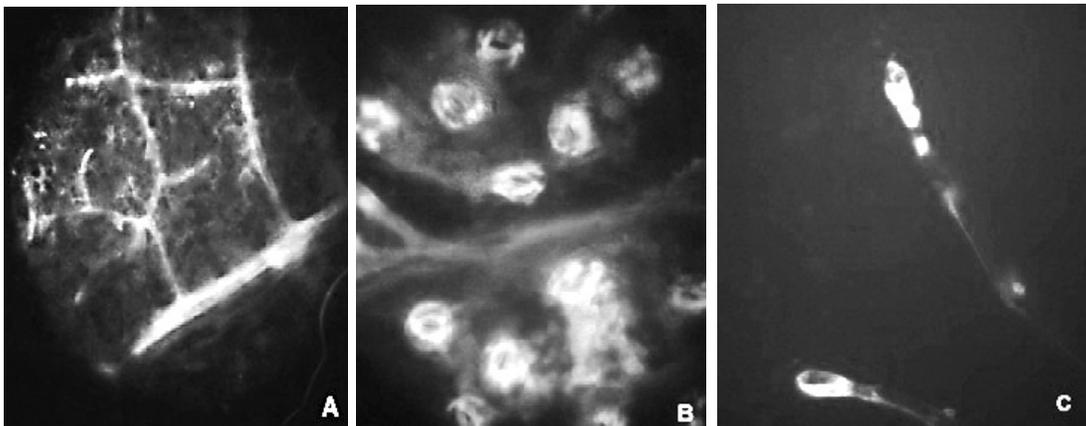


Figura 6. Corte paradermal abaxial de hojas agroinfiltradas al vacío de *Nicotiana tabacum*. A: 40X (A) nervadura reticulada (B) estomas (C) tricomas.

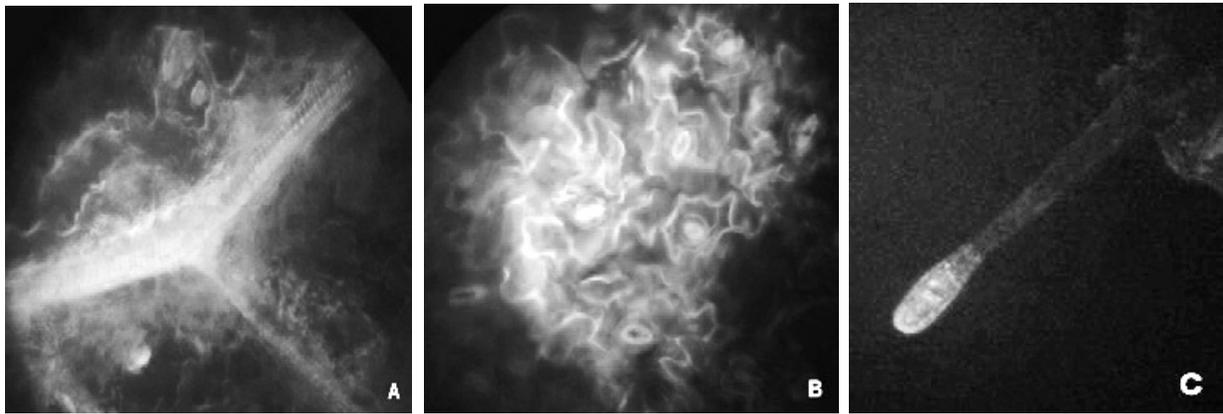


Figura 7. Corte paradermal abaxial de hojas agroinfiltradas con jeringa de *Nicotiana tabacum*. A: 40X (A) nervadura reticulada (B) estomas (C) tricomas.

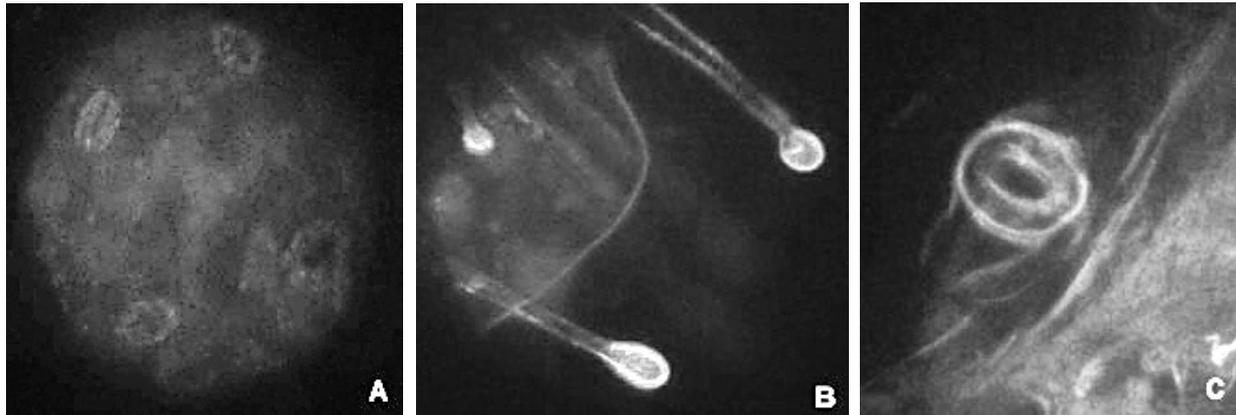


Figura 8. Corte paradermal abaxial de hojas del ensayo control de *Nicotiana tabacum*. A: 40X (A) estomas (B) tricomas (C) estoma.

Cuadro 1. Cuantificación del ADN extraído empleando el Nanodrop

MUESTRA	A260	A260/A280	µg/µL
Control BY-2 + selección	0.673	1.21	33.6
Control T ₁ + selección	3.068	1.55	153.4
Control BY-2 - selección	0.959	1.30	48.0
Control T ₁ - selección	2.808	1.62	140.4
T ₁ 15m	3.262	1.57	163.1
T ₁ 30m	4.001	1.58	200.1
BY-2 15m	6.547	1.57	327.3
BY-2 30m	4.810	1.48	240.5

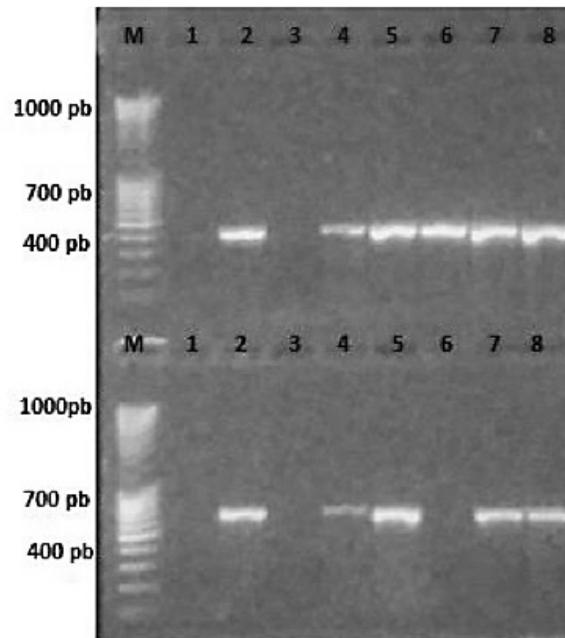


Figura 9. Electroforesis en gel de agarosa (1.5%) de los productos de PCR obtenidos de los callos transformados: M. Marcador Mass Ruler DNA 1. BY-2 en medio de selección 2. Control T1 en medio de selección 3. BY-2 en medio sin selección. 4. Control T1 en medio sin selección 5. BY-2 30m 6. BY-2 15m 7. T1 30 m 8. T1 15 m.

Discusión

Ensayo de transformación estable

Como se mencionó, la ventaja de utilizar callos en los procesos de transformación genética radica en que hay bajo riesgo en que se generen mutaciones quiméricas en las plantas, a diferencia de otros tejidos diferenciados, sin embargo posee la desventaja de que es un proceso muy lento [12]. Por otra parte, en la mayoría de los protocolos de transformación genética se recomienda el uso de compuestos fenólicos como inductores de los genes *vir*. En este caso se utilizó acetosiringona, con el fin de incrementar la eficiencia del proceso de transformación [13] [14].

Por otra parte, durante el proceso de transformación, para la línea T₁ fue más fácil reconocer los posibles callos transformados ya que al subcultivarlos en medio selectivo con menor concentración de Higromicina (10 mgL⁻¹), se observó el crecimiento aislado de los callos, coincidiendo con los reportado por Al Abdallat *et al.* [9], quienes obtuvieron crecimiento de callos transformados de *Crataegus aronia* luego de mantener y subcultivar durante 4 semanas en medio de selección a esta misma concentración de Higromicina.

La oxidación y necrosis que se observó en los callos (principalmente de la línea T₁), se debe a la respuesta a las condiciones de estrés que genera la composición del medio de cultivo. Barbosa y Chaparro [15] explican que a partir de 25 mgL⁻¹ la Higromicina B causa necrosis en los callos, por esta razón es que la concentración del antibiótico se bajó a 10 mgL⁻¹ para favorecer el crecimiento de los posibles callos transformados. Por otra parte, según los mismos autores, es posible que los callos resistan de alguna forma a la acción tóxica de la Higromicina B, por lo que no todos mueren, lo cual puede ser una explicación al comportamiento observado en los callos de la línea BY-2, el cual presentó únicamente un leve cambio de color a marrón.

Esto podría relacionarse con lo expuesto por Padilla y Burgos [16], quienes explican que en respuesta al antibiótico puede haber un incremento en las metilaciones del ADN, y por ende un reducido crecimiento de las células.

Ensayo de transformación transitoria

El análisis de la expresión de GFP se llevó a cabo el día siete después del procedimiento de la agroinfiltración. En este punto del ensayo fue posible observar importantes lesiones en las hojas agroinfiltradas. Estas lesiones consistían en un deterioro del material vegetal en las regiones próximas a los puntos de agroinfiltración. Según Rico *et al.* [5], los ensayos de expresión transitoria mediante *Agrobacterium* se llevan a cabo generalmente en *N. tabacum* debido a que dicha bacteria no genera ningún efecto visible en la salud de la planta. Hernández & González [17], reportan que antibióticos como rifampicina y cefotaxima (cefalosporina) pueden generar mínimos efectos secundarios (no fitotóxicos). Las pruebas realizadas para determinar la fitotoxicidad de ceftriaxona mostraron que no existe ningún efecto visible sobre la salud de la planta hasta una concentración de 700 mg. Sin embargo estas pruebas se realizaron con material vegetal que no se encontraba bajo condiciones de estrés (heridas, cambios de presión, introducción de una bacteria), por lo tanto poseían una mayor capacidad para soportar una concentración de antibiótico alta, a diferencia de aquellas hojas que fueron agroinfiltradas.

Di Sansebastiano y colaboradores [18] reportan que la expresión de GFP inhibió la organogénesis en células de *N. tabacum* transformadas de forma estable. Además indica que la saturación de las vacuolas con GFP causa efectos negativos en las células de *Nicotiana tabacum*, por lo tanto se puede asumir que la expresión transitoria de este gen marcador afecto la salud del tejido.

Evaluación de la expresión estable / transitoria de los genes bajo estudio

Observación bajo microscopio de fluorescencia

La proteína verde fluorescente es el gen reportero más utilizado y más efectivo en la ingeniería genética de plantas [19].

En el caso de los callos, los tratamientos T1 15m, T1 30m, BY-2 15 m y BY-2 30m, mostraron fluorescencia verde intenso, lo cual indica la expresión de la proteína verde fluorescente para cada muestra.

Con respecto a los ensayos de agroinfiltración, la localización de la proteína fluorescente observada en los estomas principalmente, se debe a que el *GFP* es un marcador que es soluble en las vacuolas [18]. Estas últimas se encuentran en abundancia en las células oclusivas de los estomas, ya que ayudan a controlar procesos de intercambio gaseoso de la planta, por lo tanto se observa muy bien la expresión transitoria del *GFP* en estas estructuras.

En ambos ensayos, en el caso de los tratamientos control se observó una fluorescencia muy débil, sin embargo esto según Al Abdallat y colaboradores [9], se puede atribuir a la posible autofluorescencia que presentan las células. Además Gupta y Ibaraki [20], explican que es posible tener fluorescencia leve que puede deberse a compuestos producidos por la planta, en este caso la producción de algunos compuestos fenólicos o ciertos pigmentos característicos de *N. tabacum* pueden influir.

PCR para los genes GUS y resistencia a Higromicina

Una vez que se logró hacer una selección de los callos y estos se observaron en el microscopio de fluorescencia, se realizó una PCR para confirmar la presencia de los genes de *hpt* y *GUS*, presentes en el vector pCAMBIA 1303 y transferidos mediante la transformación con *Agrobacterium*. Los resultados de este análisis de ADN genómico afirman la presencia del gen

hpt para todos los tratamientos como lo muestra la Figura 1, sin embargo para los tratamientos control de la línea T1 se obtuvieron bandas, lo cual no se esperaba ya que ambos son controles negativos.

A pesar de este resultado, puede considerarse despreciable ya que anteriormente las muestras al ser observadas bajo el microscopio de fluorescencia, no indicaron estar transformadas por ausencia de fluorescencia intensa.

De manera similar sucedió a la hora de comprobar la presencia del gen *GUS*, sin embargo no se obtuvo una banda para la muestra BY-2 15m (Figura 1). Lo anterior se puede deber que el producto de PCR no amplificara bien por la influencia de diferentes compuestos fenólicos generados por la necrosis celular, que como se mencionó, la línea BY-2 presentó inicio de necrosis o simplemente pérdida de viabilidad. En el Cuadro 1. se observa que la A260/A280 nm luego de cuantificarla en el Nanodrop® para esta muestra fue de 1.57, lo cual según Garrido [20], indica que se obtuvo una baja calidad y pureza del ADN. El mismo autor menciona que es importante tener en cuenta este parámetro, esto porque la relación A260/A280 nm se espera que tenga un valor entre 1.8 y 2, por tanto las condiciones de calidad y pureza no eran óptimas.

Conclusiones

Se concluye que, bajo las condiciones de laboratorio y la metodología desarrollada se logró la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas de *Nicotiana tabacum* L de forma exitosa, además se logró la inducción y establecimiento de un sistema de callogénesis somática a partir de segmentos de hojas de *N. tabacum* L, empleando ANA y BAP como reguladores de crecimiento.

La Higromicina B es un agente de selección adecuado para el desarrollo de ensayos de ingeniería genética de plantas, sin embargo, se debe de analizar el efecto sobre la viabilidad de las células sometidas a la transformación estable.

Respecto a los ensayos de transformación estable, se concluye que ambos tiempos de contacto entre la suspensión bacteriana y el callo (15 min y 30 min) son adecuados para el proceso de transformación genética para ambas líneas utilizadas.

Al observar bajo el microscopio de fluorescencia la expresión de la proteína verde fluorescente (GFP) y por medio de la amplificación del gen *hpt* y *GUS* por la técnica de PCR, se logró comprobar la integración de los genes reporteros en el genoma de *N. tabacum* L y *N. tabacum* L. cv. Bright Yellow 2.

El desarrollo de los ensayos de agroinfiltración por jeringa y al vacío fueron exitosos utilizando *Nicotiana tabacum* L y la cepa de *Agrobacterium tumefaciens* LBA 4404-2915 bajo las condiciones controladas proporcionadas en el laboratorio, estos resultados indican que la agroinfiltración es una buena técnica para producción de proteínas de interés farmacológico o industrial en un tiempo muy corto y con bajos costos.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de agentes antioxidantes como el ácido cítrico, previo a que se realice la transformación estable, ya que se evita considerablemente la oxidación de los callos a transformar [13]. Por otra parte, se recomienda que se añada L-cisteína, ditiotreitól (DDT) y tiosulfato de sodio al medio de co-cultivo ya que esto puede incrementar la eficiencia del proceso de transformación.

Secuenciar los productos de PCR de los callos transformados obtenidos usando primers específicos para detectar los genes de resistencia a Higromicina (hpt) y β -glucoronidasa (GUS) y de la proteína verde fluorescente (gfp) para así tener mayor certeza de la transformación del ADN genómico de las células de callo.

Con respecto a la transformación transitoria, se recomienda que para producción de proteínas a mayor escala, se optimice el protocolo establecido, ya que los niveles de expresión óptimos de la proteína se obtienen entre 2-3 días después de la agroinfiltración [21][22]. Además se recomienda considerar el uso de material vegetal establecido en invernadero con el fin de disminuir costos [10].

Con respecto a la detección de GFP en el material transformado de forma transitoria, el microscopio que se utilizó solo permitía hacer una comprobación visual de la expresión del gen, por lo tanto se recomienda que para futuros proyectos se utilicen otras técnicas para comprobar esta expresión, como PCR. En caso de utilizar los mismos genes marcadores utilizados en este proyecto, se recomienda realizar además una detección de expresión transitoria evidenciando GUS.

Referencias

- [1] P. Basaran y E. Rodríguez-Cerezo, «Plant molecular farming: opportunities and challenges», *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 28, n.o 3, pp. 153–172, 2008.
- [2] C. Navarre, B. De Muynck, G. Alves, D. Vertommen, B. Magy, y M. Boutry, «Identification, gene cloning and expression of serine proteases in the extracellular medium of *Nicotiana tabacum* cells», *Plant Cell Rep.*, vol. 31, n.o 10, pp. 1959–1968, 2012.
- [3] G. Ali, F. Hadi, Z. Ali, M. Tariq, y M. A. Khan, «Callus induction and in vitro complete plant regeneration of different cultivars of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) on media of different hormonal concentrations», *Biotechnology*, vol. 6, n.o 4, pp. 561–566, 2007.
- [4] H. Peyret y G. P. Lomonossoff, «The pEAQ vector series: the easy and quick way to produce recombinant proteins in plants», *Plant Mol. Biol.*, vol. 83, n.o 1-2, pp. 51–58, 2013.
- [5] A. Rico, M. H. Bennett, S. Forcat, W. E. Huang, y G. M. Preston, «Agroinfiltration reduces ABA levels and suppresses *Pseudomonas syringae*-elicited salicylic acid production in *Nicotiana tabacum*», *PLoS One*, vol. 5, n.o 1, p. e8977, 2010.
- [6] Q. Chen, H. Lai, J. Hurtado, J. Stahnke, K. Leuzinger, y M. Dent, «Agroinfiltration as an effective and scalable strategy of gene delivery for production of pharmaceutical proteins», *Adv. Tech. Biol. Med.*, vol. 1, n.o 1, 2013.
- [7] T. Murashige y F. Skoog, «A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures», *Physiol. Plant.*, vol. 15, n.o 3, pp. 473–497, 1962.
- [8] D. U. Santos-Ballardo et al., «Expression of the acidic-subunit of amarantin, carrying the antihypertensive biopeptides VY, in cell suspension cultures of *Nicotiana tabacum* NT1», *Plant Cell Tissue Organ Cult. PCTOC*, vol. 113, n.o 2, pp. 315–322, 2013.
- [9] A. M. Al Abdallat, J. S. Sawwan, y B. Al Zoubi, «*Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of callus cells of *Crataegus aronia*», *Plant Cell Tissue Organ Cult. PCTOC*, vol. 104, n.o 1, pp. 31–39, 2011.
- [10] G. Medrano, M. J. Reidy, J. Liu, J. Ayala, M. C. Dolan, y C. L. Cramer, «Rapid system for evaluating bioproduction capacity of complex pharmaceutical proteins in plants», en *Recombinant Proteins From Plants*, Springer, 2009, pp. 51–67.
- [11] T. L. Soares, O. N. de Jesus, J. A. dos Santos-Serejo, y E. J. de Oliveira, «In vitro pollen germination and pollen viability in passion fruit (*Passiflora* spp.)», *Rev. Bras. Frutic.*, vol. 35, n.o 4, pp. 1116–1126, 2013.
- [12] S. E. Bull, J. A. Owiti, M. Niklaus, J. R. Beeching, W. Grisseem, y H. Vanderschuren, «*Agrobacterium*-mediated transformation of friable embryogenic calli and regeneration of transgenic cassava», *Nat. Protoc.*, vol. 4, n.o 12, p. 1845, 2009.
- [13] J. T. Opabode, «*Agrobacterium*-mediated transformation of plants: emerging factors that influence efficiency», *Biotechnol. Mol. Biol. Rev.*, vol. 1, n.o 1, pp. 12–20, 2006.

- [14] K. Subramanyam, K. Subramanyam, K. V. Sailaja, M. Srinivasulu, y K. Lakshmidēvi, «Highly efficient *Agrobacterium*-mediated transformation of banana cv. Rasthali (AAB) via sonication and vacuum infiltration», *Plant Cell Rep.*, vol. 30, n.º 3, pp. 425–436, 2011.
- [15] I. D. B. Cepeda y A. C. Giraldo, «Concentración mínima inhibitoria de higromicina B en callos embriogénicos de arroz (*Oryza sativa* L.)», *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 13, n.º 2, pp. 193–198, 2011.
- [16] I. M. G. Padilla y L. Burgos, «Aminoglycoside antibiotics: structure, functions and effects on in vitro plant culture and genetic transformation protocols», *Plant Cell Rep.*, vol. 29, n.º 11, pp. 1203–1213, 2010.
- [17] Y. Hernández y M. E. González, «Efectos de la contaminación microbiana y oxidación fenólica en el establecimiento in vitro de frutales perennes», *Cultiv. Trop.*, vol. 31, n.º 4, pp. 0–0, 2010.
- [18] G. P. Di Sansebastiano, L. Renna, M. Gigante, M. De Caroli, G. Piro, y G. Dalessandro, «Green fluorescent protein reveals variability in vacuoles of three plant species», *Biol. Plant.*, vol. 51, n.º 1, pp. 49–55, 2007.
- [19] S. D. Gupta y Y. Ibaraki, *Plant tissue culture engineering*, vol. 6. Springer, 2006.
- [20] G. M. Garrido Ortiz, «Aislamiento y evaluación de la integridad de ADN mediante el método de extracción CTAB y reacción en cadena de la polimerasa (PCR) en muestras de balanceados de consumo animal preparado a base de maíz», B.S. thesis, Quito: USFQ, 2015, 2015.
- [21] M. Wydro, E. Kozubek, y P. Lehmann, «Optimization of transient *Agrobacterium*-mediated gene expression system in leaves of *Nicotiana benthamiana*», *ACTA Biochim. Pol.-Engl. Ed.*, vol. 53, n.º 2, p. 289, 2006.
- [22] Y. Yang, R. Li, y M. Qi, «In vivo analysis of plant promoters and transcription factors by agroinfiltration of tobacco leaves», *Plant J.*, vol. 22, n.º 6, pp. 543–551, 2000.

Recuperación de los residuos sólidos en el Tecnológico de Costa Rica a 15 años de la creación de la actividad permanente Manejo de Residuos Institucionales MADI

Recovery of solid waste at Costa Rica Institute of Technology 15 years after the creation of the permanent activity Institutional Waste Management MADI

Joaquín Jiménez-Antillón¹, Alina Rodríguez-Rodríguez²,
Macario Pino-Gómez³

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2018
Fecha de aprobación: 29 de mayo de 2018

Jiménez-Antillón, J; Rodríguez-Rodríguez, A; Pino-Gómez, M. Recuperación de los residuos sólidos en el Tecnológico de Costa Rica a 15 años de la creación de la actividad permanente Manejo de Residuos Institucionales MADI. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 92-106.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4121>

- 1 Docente investigador Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: joajimenez@tec.ac.cr
- 2 Regente Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alirodriguez@tec.ac.cr
- 3 Docente investigador Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mpino@tec.ac.cr



Palabras clave

Estudio de composición; residuos sólidos valorizables; relleno sanitario; universidades.

Resumen

Se realizó un análisis de la generación de los residuos producidos en el Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, tanto para los materiales recuperados por el Centro de Acopio Institucional (MADI), así como para los residuos enviados al relleno sanitario. Las cantidades de los residuos valorizables fueron proporcionados por el MADI. Se emplearon referencias bibliográficas para contar con las cantidades de los residuos orgánicos provenientes de la Soda Comedor. Las cantidades de residuos enviados al relleno sanitario se obtuvieron mediante un estudio de composición durante el primer semestre del 2013 y 2014, basándose en la metodología recomendada por el Ministerio de Salud de Costa Rica, MINSA. Los tipos de residuos se simplificaron en tres categorías: valorizable, compostable y no recuperable. Se escogió el 50% de los centros de transferencia de materiales, que son enviados al relleno. El estudio de composición se basó en muestras que variaron entre el 23,3 y el 73,4% de la masa total de residuos de los centros de transferencia. Se encontró que del total de residuos enviados al relleno un (60 ± 1) % no eran valorizables, mientras que un (29 ± 2) % y un (12 ± 1) % pudieron ser recuperados por MADI o compostables, respectivamente. Para el 2015, el MADI recuperó el 63% de los residuos con potencial valorizable y la Soda Comedor un 66% de los residuos de alimentos. Sin embargo, se debe trabajar en una estrategia que pueda mejorar el desempeño de la gestión de residuos sólidos institucionales.

Keywords

Composition study; valorizable solid waste; sanitary landfill; universities.

Abstract

An analysis of the generation of the waste produced at the Central Campus of the Costa Rica Institute of Technology was carried out, both, for the materials recovered by the Institutional Collection Center (MADI), as well as for the waste sent to the landfill. The amounts of the recoverable materials were provided by MADI. Literature references were used to count the quantities of organic waste from the Institutional Restaurant. The amount of waste sent to the landfill were obtained through a composition study during the first semester of 2013 and 2014, based on the methodology recommended by the Costa Rica Ministry of Health (MINSA). The waste types of this methodology were simplified into three categories: recoverable, compostable and non-recoverable. 50 % of the transfer stations of waste sent to landfill were chosen. The composition study was carried out on samples that varied between 23.3 and 73.4 % of the total mass of waste from the chosen transfer stations. It was found that from the total waste sent to the landfill (60 ± 1) % were not recoverable, while (29 ± 2) % and (12 ± 1) % were recoverable by MADI or compostable, respectively. For 2015, MADI recovered 63% of the total waste with recyclable potential of the total institutional waste stream, and the Restaurant 66% of total food waste. However, the institute must work on a strategy that can improve the performance of the integral management of institutional solid waste.

Introducción

La gestión de los residuos sólidos en los países en desarrollo posee diferentes problemas, cuyas soluciones están ligadas principalmente por condiciones culturales y de política, falta de recursos tanto técnicos como económicos. El problema más importante es la disposición final, cuyo impacto más relevante es la contaminación de aguas subterráneas por lixiviados y la generación de gases con efecto invernadero provenientes de botaderos a cielo abierto sin ningún control ambiental [1], [2]. Costa Rica no escapa a ese problema donde según el Censo de Población y Vivienda del año 2011, cerca de un 83% de los hogares encuestados disponían los residuos sólidos (RS) a un sitio de disposición final con camión recolector, un 5% los enterraba, cerca de un 10% los quemaba y alrededor de un 2% los tiraba a lotes baldíos, ríos, quebradas o al mar [3]. La situación se agrava al considerar que el país con 5 millones de habitantes (2018) [4], la generación de RS domiciliarios alcanza un valor de 0,66 Kg por habitante por día [3] dando una generación total diaria de más de 3 300 toneladas métricas.

En zonas urbanas la gestión de los residuos sólidos es mucho más eficiente que el que se brinda en zonas rurales, por ejemplo, en el Gran Área Metropolitana de San José (GAM) los RS se envían principalmente a rellenos sanitarios, mientras que en zonas rurales los gobiernos locales carecen de recursos para disponerlos adecuadamente, siendo estos enviados a vertederos a cielo abierto y/o descargados directamente en los cauces de los ríos donde no reciben ningún tipo de tratamiento [5].; esta situación se ha agravado por la marcada expansión de la actividad turística en las zonas rurales [6].

Las municipalidades desempeñan un papel fundamental en la gestión de los residuos sólidos, sin embargo, el aumento descontrolado de residuos hacia las municipalidades, causado por el incremento en la población y la acelerada urbanización, ha traído como consecuencia un incremento en el costo social y económico relacionado con la recolección, transporte y disposición final de los RS [7]. Por ejemplo, en Costa Rica en el año 2010 se publica la Ley para la Gestión Integral de Residuos (GIR) donde se asigna a las municipalidades las funciones específicas para la gestión integral de los RS que se generan en sus cantones. Sin embargo, actualmente en este sector existe un pobre desempeño para lograrlo atribuido principalmente a la insuficiencia de ingresos y a la falta de actualización de las tarifas por servicios municipales [8]. Se sabe que la composición porcentual de los RS es predominantemente materia orgánica biodegradable la cual varía entre un 50 y 60% en peso, sin embargo, a la fecha, el compostaje no es una prioridad en los planes de manejo del sector municipal porque esta tecnología requiere de una elevada inversión inicial [5]. El manejo inapropiado de los residuos provenientes de alimentos en rellenos y botaderos contribuye de un 4% a un 11% en las emisiones de gases con efecto invernadero a nivel mundial [2]. Actualmente, 31 de las 81 Municipalidades no dan servicio diferenciado de recolección de RS valorizables en viviendas [3] y según esta misma fuente, solo 5 cantones del país superan una tasa de recolección de RS valorizables del 5%.

Una forma de aportar a este panorama es la incorporación de programas de manejo de RS en los centros de estudio superior. El caso de las universidades es bastante interesante debido al gran tamaño de las mismas, y más que todo porque estas tienen a cargo la gestión de sus propios RS. Debido a la naturaleza integral de sus actividades, las universidades pueden fácilmente diseñar sus propios sistemas de manejo de residuos [1]. Además, las universidades están en la capacidad y tienen la responsabilidad de mostrar sus experiencias a la comunidad nacional. Universidades como el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) conforman un espacio con dimensiones y actividades de consumo similares a las de una pequeña ciudad.

En el TEC, la actividad permanente Manejo de Residuos Institucionales (MADI) ha sido la entidad responsable de gestionar los residuos sólidos ordinarios generados en su Campus Central desde el año 2000 [9]. Su principal objetivo ha sido aumentar la separación de

materiales recuperables para ser reutilizados o reciclados con el fin de reducir su disposición en vertederos. El TEC es una universidad estatal que en su Sede Central Cartago actualmente cuenta con una población de 8 830 habitantes, según el Departamento de Recursos Humanos y la Oficina de Registro para el 2017, incluidos estudiantes y funcionarios.

El propósito de este trabajo es mostrar la experiencia del TEC en el manejo de los RS como un ejemplo para otras universidades de países en desarrollo.

Los estudios de composición son importantes para el adecuado manejo de los RS en instituciones, porque de estos se obtiene el potencial de recuperación de materiales valorizables, la identificación de las fuentes de generación por sus componentes, la estimación de la capacidad calorífica de los distintos materiales, entre otros [10].

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo general de este trabajo, por un lado, es determinar las cantidades y la composición de los materiales que ingresan al centro de acopio institucional y que se envían al relleno desde la Sede Central del TEC, para proveer recomendaciones a la administración institucional acerca de estrategias para la minimización de residuos sólidos, para obtener altas tasas de reciclaje e incrementar la sostenibilidad del programa MADI. Por otro lado, se documenta el desempeño que ha tenido el MADI para el período 2000-2015.

Materiales y métodos

Este estudio fue realizado en el campus de la Sede Central del TEC. Dentro del campus están ubicadas unidades de transferencia de materiales, conocidas comúnmente como baterías de reciclaje, que permiten almacenar los residuos valorizables con cierto grado de separación. Los residuos valorizables son recolectados y trasladados al centro de acopio mediante un servicio contratado donde son clasificados, acondicionados, embalados, pesados, almacenados y despachados a las empresas para su respectivo reciclaje. La cantidad de materiales recolectados y mercadeados son debidamente cuantificados y se dispone de un sistema estandarizado donde se reporta la información de las actividades y resultados del MADI.

Materiales

Para medir la masa de los residuos se utilizó una romana electrónica de piso marca Pollini con capacidad para $(4000,0 \pm 0,5)$ Kg. Para realizar el estudio de composición se utilizó una romana electrónica, marca CAS, modelo PB-150, con capacidad para $(150,00 \pm 0,02)$ Kg.

Indicadores del desempeño del Programa Manejo de Residuos Institucionales (MADI)

Las cantidades de materiales valorizables por el MADI, los residuos electrónicos, los tubos fluorescentes y luminarias de alumbrado público procesados fueron cantidades reales y se cuantificaron a través del MADI y del Centro de Transferencia y Transformación de Materiales CTTM, para el año 2015. Los residuos de alimentos provenientes del restaurante institucional fue una cantidad extrapolada a partir de un estudio elaborado por Ramírez [11]. La cantidad de residuos enviados al relleno sanitario fue suministrada por el Departamento de Servicios Generales para el 2015. Para calcular el indicador de la generación de residuos por habitante y año se consideró la población total de estudiantes y funcionarios para el año 2015 y la cantidad de residuos generados ese año según la categoría del residuo (ver cuadro 2). El valor del indicador fue el cociente de la masa total del residuo generado durante ese año dividido por la población total institucional. Para calcular la generación de residuos por habitante y día se dividió el cociente anterior por 226, dado que esa es la cantidad de días hábiles por año.

Estudio de composición

El estudio de composición fue realizado únicamente en muestras de residuos que son enviados al relleno, ya que los residuos valorizables, orgánicos provenientes del restaurante, electrónicos y los tubos fluorescentes son procesados y cuantificados por aparte. Las categorías de los materiales fueron seleccionadas de tal forma que fueran comparables con estudios de composición anteriores a nivel nacional [8]. Fue seleccionado un set de 11 categorías de acuerdo con las regulaciones del Ministerio de Salud de Costa Rica [12] como sigue: compostable, papel y cartón, plásticos, vidrio, metales, textiles, empaques Tetra pack, residuos peligrosos, electrónicos y otros. La lista anterior de categorías se simplificó de manera que solo se obtuvieran tres categorías primarias (compostable, valorizable y no recuperable) según se muestra en el cuadro 1. El estudio de composición fue realizado durante el primer semestre de los años 2013 y 2014, de febrero a junio. Se escogieron 5 de las 10 unidades de transferencia de materiales con que contaba el campus en ese entonces, para ser muestreadas, a saber: Restaurante Institucional, la Librería, el Departamento Financiero, los Edificios F y las Residencias Estudiantiles. En cada una de las 5 unidades escogidas se cuantificó, una única vez cada año, la cantidad total de residuos contenida en ella y que se encontraba en bolsas plásticas. Se cuantificó la masa total del material contenido en todas las bolsas. Luego se escogió una muestra representativa de estas bolsas, se combinó su contenido con una pala, se clasificó el material según las diferentes categorías y se pesó por separado cada una de ellas. A partir de estos datos se calculó la fracción por masa que cada categoría representó en la muestra total. Con base a la composición encontrada en los dos muestreos (2013 y 2014), se calcularon valores promedio para cada tipo de material, según la clasificación establecida anteriormente, para cada una de las 5 áreas de muestreo (cuadro 5). Luego se calculó la composición promedio general para cada tipo de material (cuadro 6). Con base a la composición promedio y a la cantidad total de residuos enviados al relleno durante un año, se estimó la cantidad total de materiales con potencial valorizable, compostable y no recuperable que es enviada anualmente al relleno.

Cuadro 1. Composición de categorías principales de residuos con base a las que propone el MINSA para estudios de composición de residuos sólidos municipales

Categoría primaria	Sub categorías (MINSA)
<i>Compostable</i>	Materia orgánica de todo tipo
<i>Reciclable</i>	Papel y cartón, plásticos, vidrio, metales, empaques, tetrapack, residuos electrónicos
<i>No recuperable</i>	Textiles, residuos peligrosos, madera, tubos fluorescentes y luminarias, residuos contaminados con comida

Resultados y Discusión

Desempeño del Programa Manejo de Residuos Institucionales

En la figura 1 se observa la cantidad total anual y la composición porcentual por masa de los residuos sólidos que se generaron en la Sede Central del TEC durante el 2015, para los cuales existe un registro de ingreso y despacho. Todas las cantidades fueron reales, con excepción

de los residuos orgánicos del restaurante institucional, la cual se estimó por extrapolación con base a la generación de residuos de la población del año 2007. Se estima que en la Sede Central se generaron 194 toneladas durante el 2015. Los materiales que tuvieron algún tipo de aprovechamiento fueron los residuos de alimentos provenientes del Restaurante Institucional (12,8%), los residuos valorizables recuperados por MADI (27,6%) y los electrónicos (2,9%), los cuales sumaron en conjunto 83 toneladas y representaron el 43% del flujo total de materiales. Los tubos fluorescentes y luminarias de alumbrado público fueron tratados químicamente y luego enviados al relleno, por tanto, no fueron considerados como residuos recuperables.

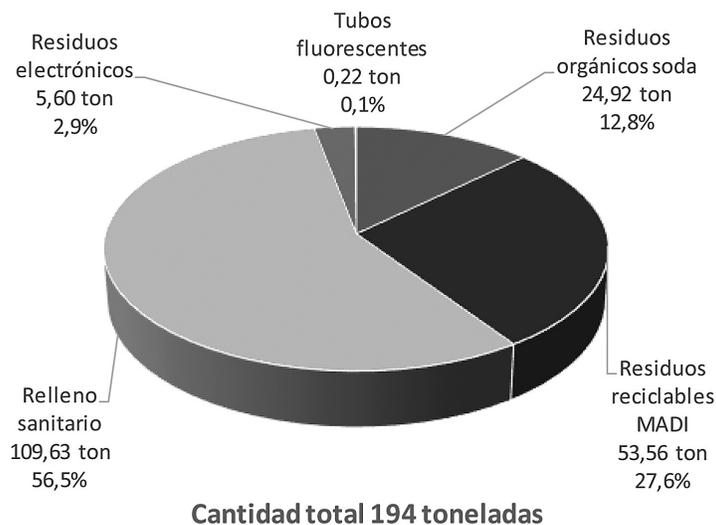


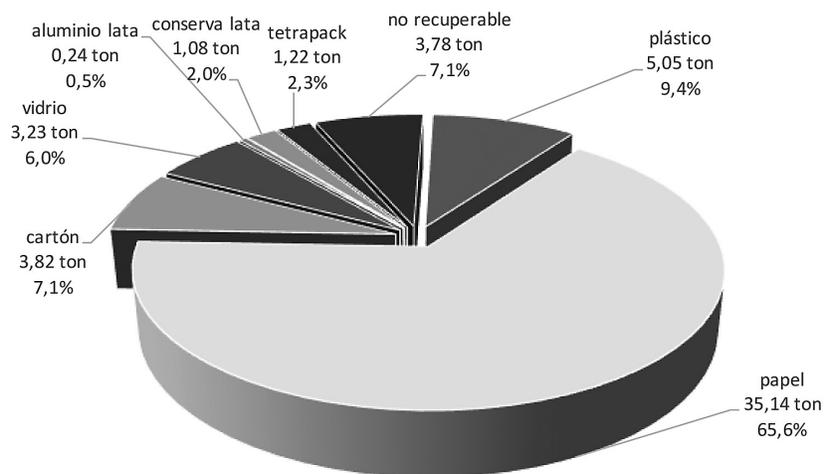
Figura 1. Cantidad (toneladas) y composición porcentual (%m/m) de los residuos ordinarios generados en el TEC, 2015

En la figura 2 se aprecia el flujo total de residuos que ingresaron al centro de acopio institucional en el año 2015, sumando un total de 53 556 kg, de los cuales 49 775 kg fueron valorizables y 3780 kg no valorizables. Con base a lo anterior, se dedujo un índice de separación en la fuente del 92,9 %. Lo anterior confirma que la población institucional sabe, en una alta proporción, qué materiales son valorizables y cómo deben ser separados correctamente. La principal ventaja de esto, es que los materiales recuperables están poco contaminados por estar poco mezclados con el resto de residuos y de esta forma se disminuyen los costos de recolección y disposición. A su vez, los plásticos que se envían a coprocesamiento mediante la utilización de un horno cementero local tienen un bajo contenido de humedad (por la no contaminación con residuos orgánicos), lo cual incrementa la eficiencia en la recuperación de la energía [2].

Se observa en la figura 2 que el papel y el cartón representaron la proporción más alta, con un 72,7%; le siguieron el plástico (9,4%), el vidrio (6,0%), las latas de conserva y aluminio (2,5%) y los envases tetrapack (2,3%). Esta tendencia concuerda con otras instituciones de educación superior de países en desarrollo [13].

Con base a los datos de la figura 1, se estimó la recuperación per cápita por año y por día (cuadro 2). La generación per cápita diaria de residuos sólidos, a nivel nacional, es de 0,63 kg/hab-día mientras que en el TEC es de 0,094 kg/hab-día. En el TEC se genera 6,7 veces menos que a nivel nacional dado que se tiene una población flotante que no permanece 24 horas en la institución y, por tanto, genera residuos de manera proporcional a su tiempo de residencia. La mayoría de estudiantes y toda la población de funcionarios tienen su domicilio, en tiempo

lectivo, fuera del campus lo cual reduce la generación de residuos dentro del campus. Además, en la cantidad reportada en este estudio no se incluyen los residuos de algunas dependencias como los demás restaurantes.



Recuperación total MADI 53,6 toneladas

Figura 2. Cantidad total (toneladas) y composición porcentual (m/m) de los residuos que ingresaron al centro de acopio institucional para el año 2015.

Cuadro 2. Generación per cápita, anual y diaria en el TEC según tipo de residuo

Tipo de residuo	Cantidad total (Ton/año)	Cantidad per cápita y año (kg/hab-año)	Cantidad per cápita y día (kg/hab-día)
Orgánico soda	24,9	2,74	0,012
Reciclable MADI	53,6	5,89	0,026
Relleno sanitario	109,6	12,07	0,053
Electrónico	5,6	0,62	0,003
Tubos fluorescentes	0,2	0,02	0,0001
Total	194,0	21,34	0,094

La generación per cápita en el TEC es comparable a la que reporta Mbuligwe [1] para diferentes poblaciones estudiantiles de universidades en Kenia, a saber: 0,190; 0,193 y 0,083 kg/hab-día para la Universidad de Dar es Salaam UDSM; el Colegio Universitario de Tierras y Estudios de Arquitectura UCLAS y el Instituto de Recursos del Agua WRI, respectivamente. Para poblaciones de funcionarios de la UCLAS y WRI, este mismo autor reporta generaciones per cápita de 0,36 kg/hab-día y para la UDSM 0,41 kg/hab-día. Estas son cantidades 3 y 4 veces superiores al indicador del TEC, respectivamente. Dado que las poblaciones de funcionarios poseen una mayor capacidad de consumo y por ende de generación de residuos, los índices de recuperación per cápita son superiores que los del TEC. Ruiz [14] reporta una generación per

cápita diaria de 0,33 kg en la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México. La misma autora reporta que la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM posee una recuperación comparable a la del TEC de 0,11 kg/hab-día; no obstante, la población de la UNAM tiene una mayor capacidad de consumo que la población del TEC, por ser una universidad privada.

En la figura 3 se observa la variación anual en la recuperación per cápita anual de los materiales que han tenido un registro de ingreso y despacho a través del MADi para el período 2000-2015. Esos datos se contrastan con la población de la Sede Central para ese mismo período. Para el período (2000-2006) la recuperación promedio fue de alrededor de 4,0 kg/persona-año. Después, el valor aumentó a 6,7 kg/persona-año, en promedio, para el período (2007-2013). Un aspecto que justifica el máximo valor obtenido en el 2008 es que hasta ese año se permitió el ingreso de personas ajenas al TEC que traían consigo materiales directamente al centro de acopio para ser procesados allí. A partir del 2009 se canceló dicha acción, de ahí la reducción en la recuperación. El crecimiento tan marcado en la recuperación a partir del 2006 hasta el año 2008, con relación al período anterior, se justifica principalmente por la mejora en el control de los registros del ingreso y despacho de los materiales. Esto se traduce también en un incremento significativo en el desempeño del programa, en tanto que la población es más consciente en el adecuado manejo de los residuos. Lo anterior se sustenta en el programa de sensibilización con que cuenta el MADi. Este consiste en que cada inicio de año a la población estudiantil entrante se le informa del funcionamiento del programa ya sea con boletines, charlas o material audiovisual. A la población estudiantil y de funcionarios ya existente se le envía digital y periódicamente información de cómo separar y tratar adecuadamente los residuos valorizables. Finalmente, a la población que visita el campus los fines de semana también se le ha dado información para el adecuado manejo de los residuos.

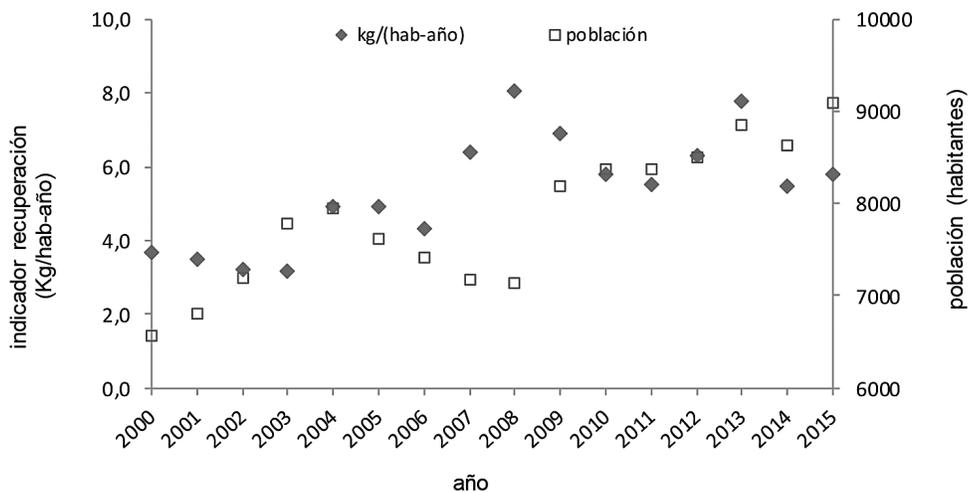


Figura 3. Indicador de desempeño del MADi para el período 2000-2015

En el cuadro 3 se presenta la composición promedio de los RS reportada en el TEC, y la composición de los RS de una zona residencial de la ciudad de Cartago y en varias universidades del mundo. Según datos de la figura 1, en el TEC la proporción valorizable, compostable y no recuperable fue de 27,6%, 12,8% y 56,5% en peso, respectivamente. Dichos resultados difieren significativamente con lo reportado por la Universidad de Columbia Británica del Norte (UNBC), en Canadá, una universidad que tiene un reciente compromiso de convertirse

en una universidad “verde”, donde la proporción del material valorizable, compostable y no recuperable fue de 49,3%, 21,6% y 28,4%, respectivamente, [15] (cuadro 3). El índice de desempeño del TEC fue un 44% inferior al de la UNBC con relación a la fracción valorizable, mientras que la proporción no recuperable fue de casi el doble en el TEC. Lo anterior se justifica porque el MADI en ese momento no tenía una cobertura total en todas las dependencias del campus, como por ejemplo en las Residencias Estudiantiles donde la población es cercana a los 200 habitantes. Se estima que los residuos provenientes de las Residencias Estudiantiles incrementan sustancialmente la contribución de residuos al relleno sanitario local.

En el cuadro 3 los datos están ordenados de forma creciente según la proporción valorizable. Se observa una gran variación en la composición según las diferentes fuentes. Se observa un alto contenido de materia orgánica en la Universidad de Dar es Salaam y en la zona residencial de clase media en Cartago [16] 52% y 55,4 %, respectivamente, que corresponden a poblaciones de países en desarrollo. En contraste, se encontraron menores porcentajes de materia orgánica en poblaciones de universidades de primer mundo donde los habitantes tienen un patrón de consumo más orientado a productos que vienen en envases reciclables. Esta tendencia se observa para las universidades de Massey [17], Columbia Británica del Norte [15] y Kebangsaan [18]. Las poblaciones de universidades de economías prósperas tienen mayor capacidad económica para comprar bienes fabricados con materiales sofisticados [2] y esto se refleja en una mayor proporción reciclable en sus residuos. Por otro lado, el contenido de materia orgánica biodegradable en el TEC es baja (12,8%) en comparación con el resto de universidades dado que en el TEC no se ha implementado (al 2015) un programa de recuperación de residuos compostables, excepto en la Soda Institucional.

Cuadro 3. Composición promedio de residuos sólidos en universidades y una zona residencial según diferentes referencias.

Composición según categoría (%m/m)			Ubicación	Fuente
Biodegradable	Valorizable	No recuperable		
52	16	32	Univ. Dar es Salaam, Tanzania	Mbuligwe, S. 2002
55,4	23,8	21,0	Zona residencial Cartago (CR)	Araya, E. 2012
31	26	43	Univ. Massey, Nueva Zelanda	Mason, I.2004
12,8	27,6	56,5	Tecnológico de Costa Rica ^(a)	Jiménez, J.2013
21,6	49,3	28,4	Univ. Columbia Británica del Norte, Canadá	Smyth, D. 2010
43	50	7	Univ. Kebangsaan, Malasia	Tiew, K. 2010

^(a) Datos tomados de la figura 1.

Caracterización de los residuos que son enviados al relleno sanitario

En el cuadro 4 se muestra el resumen de las áreas muestreadas durante el estudio de composición realizado. Durante el primer muestreo se colectaron 135 bolsas para un total de 548,14 kg. Durante el segundo muestreo se colectaron 77 bolsas con una masa total de 323,02 kg. El 44% de la masa total fue separada y clasificada.

Cuadro 4. Resumen de los residuos clasificados y masa total en cada unidad de transferencia

Año	2013			2014		
Área	No. bolsas colectadas	Masa total (kg)	Masa de la muestra clasificada (kg)	No. bolsas colectadas	Masa total (kg)	Masa de la muestra clasificada (kg)
Restaurante	32	215,76	50,30	18	134,46	49,92
Edificios F	54	119,18	35,00	11	37,18	30,58
Librería	17	76,00	31,94	33	77,90	26,90
Departamento Financiero	26	65,28	34,14	8	38,40	36,60
Residencias estudiantiles	6	71,92	52,82	7	35,08	34,20
Total	135	548,14	204,20	77	323,02	178,20

De las 109,6 toneladas de residuos enviados al relleno una considerable cantidad presentó potencial valorizable y compostable como se aprecia de las figuras 6 y 7. Se encontró una alta variabilidad en la composición según la fuente de generación. Lo anterior concuerda con lo que reporta Sfeir [10] y Armijo [19] donde indican que la composición de los residuos es extremadamente variable debido a factores temporales, geográficos, demográficos, de estándar de calidad de vida, entre otros.

En el cuadro 5, se aprecia la composición porcentual por categoría de los residuos encontrados en las 5 unidades de transferencia muestreadas. Los valores son promedios de los dos muestreos con la desviación estándar correspondiente. Se observa que la proporción con potencial reciclable va desde un 10,3% (encontrado en el restaurante) hasta un 41,8% (librería) del peso total muestreado. La ubicación con la mayor proporción de residuos reciclables fue la librería cuyo principal componente fue el cartón (27 ± 33 %, cuadro 5). Esto se justifica porque la librería genera gran cantidad de este material. Las cajas de cartón no siempre es posible recuperarlas dado que se deben de desarmar y no siempre hay personal dispuesto a hacerlo, por tanto, muchas veces se disponen en el relleno sanitario. Con lo anterior se muestra una limitación del programa dada la escasa mano de obra disponible para la recuperación de todo el material susceptible a ser reciclado.

La valoración realizada en la soda comedor representó una situación anómala y que ocurrió por un corto período, dado que en el momento del muestreo del 2013 se estaba utilizando vajilla desechable porque la máquina lavaplatos estaba fuera de operación. Por esa razón, se obtuvo una alta proporción de material no recuperable (un 64,8% para el año 2013, datos no mostrados) el cual estaba constituido esencialmente por vajilla plástica desechable y papel, ambos contaminados con comida.

En el centro de transferencia del Departamento Financiero se encontró la mayor proporción de material no recuperable de todos los sitios muestreados, con un 77% del peso total correspondiente al año 2013 (datos no mostrados). Los principales componentes de esa porción no recuperable fueron papel y productos de papel contaminados con pintura provenientes de la Escuela de Diseño Industrial, la cual se ubicaba contiguo al centro de transferencia en cuestión.

Estas variaciones hacen difícil obtener una muestra precisa y representativa de la composición de los residuos empleando la metodología citada en este estudio.

El área de los edificios F que son aulas, es una zona de alto tránsito de estudiantes. Consecuentemente, en este sitio se encontró la mayor proporción de empaques Tetrapack y de botellas plásticas, como se aprecia del cuadro 5.

Cuadro 5. Composición promedio porcentual (%m/m) de los materiales que se envían al relleno sanitario encontrados en 5 áreas del Campus Central.

Área/Composición porcentual promedio											
Categoría Primaria	Sub categoría	Restaurante		Edificios F		Librería		Financiero		Residencias	
		X	ds	X	ds	X	ds	X	ds	X	ds
Valorizable	Papel/cartón	0	0	7	8	27	33	12	2	13	15
	Plástico	7	4	10	6	10	6	5,9	0,3	20	13
	tetrapack	2	2	6	3	4	3	2	1	1,4	0,7
	Latas metal	1,3	0,8	1,9	0,1	0,8	0,5	1,1	0,3	0,9	0,7
	Vidrio	0	0	1	2	1	2	0	0	1,2	0,6
	Electrónicos	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6
Compostable	Orgánicos	18	7	19	9	5	7	7	7	9	10
No recuperable	No aplica	72	10	54	10	52	18	71	9	51	12

Nota: X es el promedio de los dos muestreos, ds es la desviación estándar

Cuadro 6. Promedio de la composición porcentual para las 5 unidades de transferencia para cada muestreo y composición promedio total de ambos muestreos (%m/m) de los residuos enviados al relleno.

Categoría primaria	Sub categoría	Muestreo			
		2013	2014	Promedio total	Desviación estándar
		Composición promedio (n = 5)	Composición promedio (n = 5)		
Valorizable	Papel/cartón	15,37	8,49	12	5
	Plástico	9,12	11,95	11	2
	Tetrapack	2,62	3,86	3,2	0,9
	Latas metal	1,41	1,00	1,2	0,3
	Vidrio	1,27	0,18	0,7	0,8
	Electrónicos	1,73	0,00	1	1
Compostable	Orgánico	10,83	12,45	12	1
No recuperable	No aplica	57,32	62,08	60	3

En el cuadro 6 se muestra la composición porcentual promediada para las 5 unidades de transferencia, para cada muestreo, en función de las diferentes categorías de residuo. También se muestra el valor promedio total de los dos muestreos. De la caracterización efectuada un (12 ± 5) % es papel y cartón principalmente proveniente de la Librería, el Departamento Financiero y las Residencias Estudiantiles como se aprecia del cuadro 5. Un (11 ± 2) % son plásticos que están presentes en todas las unidades de transferencia, principalmente en la unidad de Residencias Estudiantiles con un (20 ± 13) %, véase cuadro 5. Los demás materiales reciclables como empaques Tetrapack, latas metálicas, botellas de vidrio y residuos electrónicos fueron encontrados en proporciones inferiores al 3%.

Tanto las latas de aluminio, conservas y el vidrio fueron encontradas en muy baja proporción en todas las áreas estudiadas. Lo anterior supone una buena separación en la fuente para estos materiales.

En la figura 4 se aprecia la distribución porcentual de la composición de los residuos encontrados para cada una de las 5 unidades de transferencia como promedio de los dos muestreos del 2013 y 2014 y con base a la categorización simplificada que se indica en el cuadro 1 (sintetizadas a las categorías primarias).

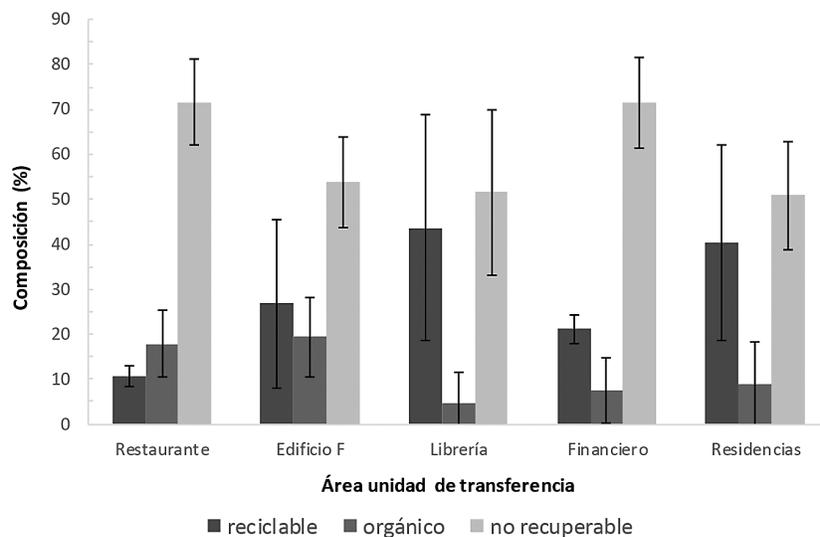


Figura 4. Composición porcentual del material que se envía al relleno sanitario de 5 unidades de transferencia de materiales con base a simplificación de categorías, 2013 y 2014. Las líneas negras son la desviación estándar.

La proporción con potencial compostable (orgánico) mostró un ámbito desde nulo (en la librería) hasta un valor máximo de 23% que fue encontrado en el restaurante. La separación y recuperación del residuo orgánico se ha comprobado que es difícil tal como lo menciona Smyth [15] tanto para las instituciones de educación superior como para las municipalidades. Los residuos orgánicos son el componente más denso del flujo de residuos, como consecuencia su disposición es más costosa y presentan el mayor potencial de emisión de gases con efecto invernadero una vez dispuestos en un botadero. La carencia de un programa que recupere los residuos compostables en las diferentes dependencias es una de las principales limitaciones con que cuenta el MADU.

Se calculó la cantidad de residuos con potencial reciclable, compostable y no recuperable que fue enviada al relleno sanitario en el 2015, con base a la cantidad real enviada al relleno

ese año (109,6 ton según figura 1). Para ello se utilizó la composición porcentual promedio total de las fracciones reciclable, compostable y no recuperable obtenidas mediante el estudio de composición (ver promedio total en el cuadro 6), a saber: reciclable (29 ± 2) % masa/masa; compostable (12 ± 1) % y no recuperable (60 ± 3) %. En la figura 5 se muestran los resultados. Se encontró que (13 ± 1) toneladas hubieran sido aprovechadas para composteo o por cualquier otra técnica de recuperación, es decir, estaban incorrectamente dispuestas. De igual manera, (31 ± 5) toneladas era material valorizable por MADI. Solo (60 ± 3) toneladas era residuo no recuperable, correctamente dispuesto. De la experiencia actual se demuestra que para lograr un alto desempeño en la separación en la fuente de los residuos, se requiere de una capacitación continua y mejorada, tanto a la población institucional como a la población visitante a la universidad.

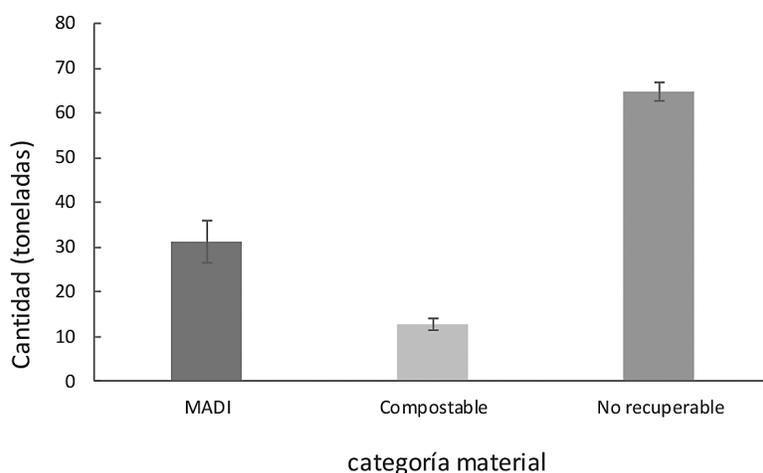


Figura 5. Cantidad total esperada de residuos sólidos según su potencial de recuperación que fue enviada al relleno. Las barras es la desviación estándar.

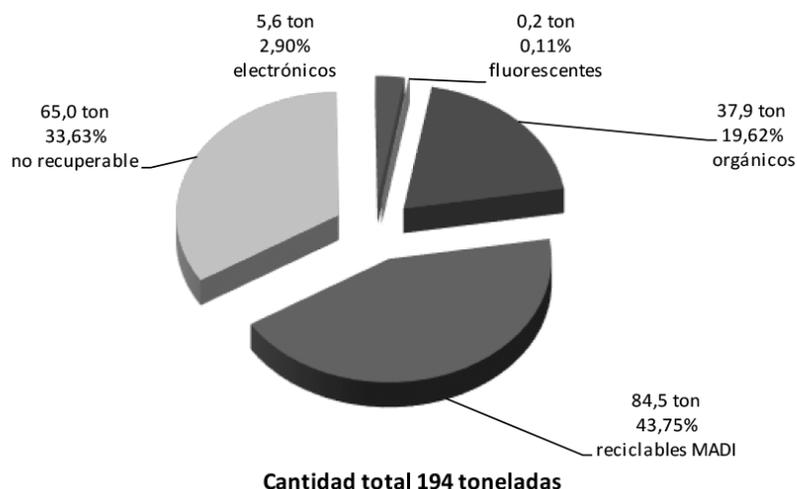


Figura 6. Cantidades y composición ideales del flujo de residuos sólidos ordinarios para el año 2015.

Con base a la figura 6, idealmente si en el 2015, el 100% de los residuos valorizables por el MADI y los residuos compostables hubieran sido separados y recuperados correctamente en la fuente, se tendrían las siguientes cantidades y composición porcentual masa/masa: residuos compostables 37,92 toneladas (19,62%), residuos reciclables por el MADI 84,56 toneladas (43,75%), residuos electrónicos 5,6 toneladas (2,90%), tubos fluorescentes y residuos no recuperables 65,22 toneladas (33,74%). Según los datos anteriores, para el 2015, en el TEC se recuperó un 63% del total de residuos que fueron susceptibles a ser recuperados por el MADI y un 66% de los residuos con potencial compostable.

Conclusiones

En el TEC, para el 2015 se valorizaron 53,6 toneladas de residuos a través del programa MADI, de los cuales el 75% corresponde a la categoría de papel y plástico (65,6% y 9,4%, respectivamente).

La población institucional cuenta con un alto grado de conocimiento sobre los residuos que son susceptibles de reciclaje, lo cual se ve reflejado en un 92,9% de índice de separación en la fuente y con porcentaje mayores al 60% en relación al total de residuos generados que son reciclables y/o compostables.

La caracterización de residuos institucionales enviados al relleno en su mayoría corresponde a residuos no valorizables con un (60 ± 1) %, mientras que un (29 ± 2) % y un (12 ± 1) % corresponde a residuos valorizables (reciclables y compostables respectivamente).

Se debe buscar una mejor estrategia de capacitación a la población, principalmente de nuevo ingreso, así como adquirir más baterías de reciclaje para que se mejore la separación de residuos valorizables que pueden ser procesados a través del MADI y evitar que (31 ± 5) toneladas sean enviados al Relleno Sanitario.

A pesar de que las categorías de papel y plástico son las que se gestionan en mayor cantidad en el centro de acopio institucional, también corresponden junto con los residuos orgánicos a los materiales reciclables que en mayor cantidad son enviados al relleno sanitario.

Se debe trabajar en un proyecto institucional que pueda gestionar los residuos orgánicos, puesto que actualmente el programa MADI no gestiona dichos residuos.

Las residencias estudiantiles son un foco alto de generación de residuos para la Institución, lo que implica que deben incluirse dentro del programa MADI para así mejorar la gestión integral de residuos generados en el campus.

Referencias

- [1] I. Mbuligwe, "Institutional solid waste management practices in developing countries: a case study of three academic institutions in Tanzania", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 35, pp. 131-146, 2002.
- [2] ISWA, "Food Waste As A Global Issue. From the perspective of municipal solid waste management." International Solid Waste Association, 2013
- [3] S. Soto, "Estado de la Nación. Vigésimosegundo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe final: Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica" pp. 26, 2016
- [4] INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos "Estimaciones y Proyecciones de la población por sexo y edad 1950-2050", San José, Costa Rica, pp. 65, 2013
- [5] S. Soto, "Estado de la Nación. Duodécimo Informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe Final Situación actual de la gestión de los residuos sólidos en Costa Rica", Costa Rica, pp. 2-4, 2006



- [6] Estado de la Nación “Decimoquinto informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe Final: Evolución e importancia del turismo en Costa Rica” pp. 3, 2009
- [7] L. Maldonado, “The economics of urban solid waste reduction in educational institutions in Mexico: A 3-year experience”, *Resources Conservation and Recycling*, vol. 48, pp. 41-55, 2006
- [8] Programa Estado de la Nación, “Decimosétimo informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: Sin progreso en el manejo de los residuos sólidos”, Costa Rica, pp. 225-227, 2012
- [9] L.G. Romero, J.C. Salas J y J. Jiménez, “Manejo de Desechos en universidades. Estudio de caso: Instituto Tecnológico de Costa Rica”, *Tecnología en Marcha*, vol. 21 n. 3, pp. 33-41, 2008
- [10] H. Sfeir, D. Reinhart and P. McCauley-Bell, “An Evaluation of Municipal Solid Waste Composition Bias Sources”, *J. Air and Waste Manage. Assoc.* vol. 49, pp. 1096-1102, 1999
- [11] E. Ramírez, “Propuesta de plan de acción para mejorar la situación actual del manejo de los Residuos Sólidos de la Soda-Comedor del Instituto Tecnológico de Costa Rica”, Informe Final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2006
- [12] MINSA, Ministerio de Salud de Costa Rica, “Metodología para estudios de generación y composición de residuos sólidos”, Regulaciones, 2012
- [13] C. Armijo de Vega, S. Ojeda-Benítez y E. Ramírez-Barreto, “Mexican educational institutions and waste management programmes: a University case study”, *Resources, Conservation and Recycling* vol. 39, pp. 283-296, 2003
- [14] M. Ruiz, “Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México”, *Rev. Int. Contam. Ambie.* Vol. 28, no. 1, pp. 93-97, 2012
- [15] D. Smyth, A. Fredeen and A. Booth, “Reducing solid waste in higher education: The first step towards ‘greening’ a university campus”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp. 1007-1016, 2010
- [16] E. Araya, “Estudio sobre el Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Ordinarios en el Distrito Oriental y el Distrito San Francisco del Cantón Central de Cartago, Costa Rica”, Informe Final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2012
- [17] I. Mason, A. Oberender and A. Brooking, “Source separation and potential re-use of resource residuals at a university campus”, *Resources, Conservation and Recycling* vol. 40, pp. 155-172, 2004
- [18] K. Tiew, S. Kruppa, N. Basri and H. Basri, “Municipal Solid Waste Composition Study at Universiti Kebangsaan Malaysia Campus”, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 6380-6389, 2010
- [19] C. Armijo de Vega, S. Ojeda-Benítez y E. Ramírez-Barreto, “Solid waste characterization and recycling potential for a university campus”, *Resources, Waste Management*, vol. 28, pp. S21-S26, 2008

Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de Pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico

Nutrients extraction, growing and production of
cucumber in hydroponic protected culture system

Carlos Ramírez-Vargas¹

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2018
Fecha de aprobación: 11 de agosto de 2018

Ramírez-Vega, C. Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de Pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 107-117.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4122>



¹ Profesor, Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: caramirez@tec.ac.cr

Palabras clave

Cucumis sativus L.; solución nutritiva; genotipos; cultivo protegido hidropónico; crecimiento; producción; absorción.

Resumen

Se sembraron tres genotipos comerciales de pepino (*Cucumis sativus* L.), Modan RZ, Tropicuke y Monalisa, en ambiente protegido con sistema hidropónico abierto en San Carlos, Costa Rica. Las plantas se trasplantaron en contenedores plásticos con sustrato de fibra de coco provisto de un sistema de fertirriego y tutorado, se realizaron mediciones de crecimiento, producción, y absorción de nutrientes. Los niveles de absorción de nutrientes, crecimiento y producción fueron diferentes entre genotipos. El orden de absorción de macronutrientes en todos los cultivares fue K>N>Ca>Mg>P, y de micronutrientes fue Fe>Zn>Mn>Cu.

Los rangos de crecimiento de los genotipos fueron de 270.03 a 287.92 y 221.72 a 278.28 cm de altura máxima, 61.86 a 82.83 y 18.27 a 20.75 hojas por planta, 432.98 a 562.83 y 148.88 a 202.47 cm² en área foliar, 6.41 a 8.34 y 2.21 a 4.16 de índice de área foliar, 294.86 a 349.70 y 174.94 a 206.50 g de peso fresco vegetativo (parte aérea + raíz), 342.60 a 361.97 y 203.67 a 274.40 g de peso fresco de fruto, 21.38 a 27.76 y 13.55 a 15.38 g de peso seco vegetativo, 5.53 a 11.06 y 4.43 a 7.92 g de peso seco de fruto respectivamente. El rendimiento en el cv Modán RZ fue superior con un total de 2895.31 g/planta, y el menor fue de 2001 g/planta.

Keywords

Cucumis sativus L.; nutrient solution; genotypes; hydroponic protected culture; growing; production; absorption.

Abstract

Three commercial genotypes of cucumber (*Cucumis sativus* L.), Modan RZ, Tropicuke y Monalisa, were grown in protected horticulture with open hydroponic system, in San Carlos, Costa Rica. Seedlings were transplant in pots ten liters capacity containing coconut fiber as substrate, irrigation system was installed, growing; production and nutrients contents were measured. Nutrients levels, growing and production were different between genotypes. Absorption order of macronutrients was K>N>Ca>Mg>P and micronutrients was Fe>Zn>Mn>Cu.

Growing ranges of genotypes were 270.03 to 287.92 and 221.72 to 278.28 cm of maximum height, 61.86 to 82.83 and 18.27 a 20.75 leafs per plant, 432.98 to 562.83 and 148.88 to 202.47 cm² in leaf area, 6.41 to 8.34 and 2.21 to 4.16 leaf area index, 294.86 to 349.70 and 174.94 to 206.50 g fresh weight vegetative, 342.60 to 361.97 and 203.67 to 274.40 g fresh weight of fruits, 21.38 to 27.76 and 13.55 to 15.38 g dry vegetative weight, 5.53 to 11.06 and 4.43 to 7.92 g dry weight of fruits. Yield was highest in the genotype Modan RZ with 2895.31 g/plant, and the smaller was 2001 g/plant.

Introducción

En Costa Rica hay regiones con potencial para la producción de hortalizas bajo ambientes protegidos como la Región Huetar Norte, donde para diversificar actividades que favorezcan la seguridad alimentaria, se incursiona en sistemas de producción tecnificados que ayuden a mejorar la calidad y abastecimiento local de productos hortícolas [1].

Actualmente, la siembra en zonas tradicionales de cultivos hortícolas ha enfrentado una disminución en su área debido a un cambio de actividades. La producción de hortalizas, como el pepino, en ambientes protegidos es una alternativa para muchos productores ya que facilita la producción en regiones cuyo condición climática no permite el cultivo a campo abierto [2] [1].

En sistemas de cultivo protegido de hortalizas, deben considerarse factores que prevalecen de acuerdo a cada zona, como el clima, tipo de coberturas, los genotipos y la disponibilidad de recursos e insumos [3].

La nutrición de las plantas durante su ciclo de cultivo, se puede proporcionar mediante la hidroponía, ya que suministra un continuo abastecimiento de nutrientes a través del sistema de riego [4]. La preparación y manejo de una solución nutritiva en cultivos sin suelo ha sido un tema de mucha investigación, ya que de acuerdo al cultivo se busca preparar una que satisfaga las necesidades de la planta, [5] [6].

Conocer la composición nutricional de un cultivar de pepino particular ayudaría a la formulación de soluciones que optimizarían el uso de fuentes de nutrientes en sistemas de cultivo sin suelo y con uso de sustratos inertes, muchas soluciones nutritivas se han formulado y ajustado variando su concentración, Steiner [7] por ejemplo, creo una solución nutritiva universal basada en el concepto de relación mutua que existe entre la concentración iónica total y la composición vegetal.

Desde 1987 se han hecho evaluaciones de cultivares de pepino en zonas no tradicionales de su cultivo, mostrando buenos rendimientos, como por ejemplo en La Fortuna de San Carlos y Cañas Guanacaste, donde cuentan con gran potencial para la producción de dicho cultivo principalmente para la exportación, sin embargo la alta humedad relativa y los fuertes vientos que caracterizan a cada una de estas regiones son las principales limitantes para su producción a campo abierto [8] [9]. La producción nacional de pepino está dirigida especialmente para la satisfacción del mercado local, la cual se comercializa en las diferentes ferias del agricultor y mercados mayoristas como el Centro Nacional de Distribución y Abastecimiento (CENADA).

Materiales y métodos

Se sembraron tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) en sistema de cultivo hidropónico abierto bajo ambiente protegido. Durante el periodo de investigación se midieron variables de crecimiento, producción y absorción, a partir de las cuales se determinaron las cantidades de los principales macro y micronutrientes absorbidos por las plantas. Se utilizó el invernadero de Horticultura en Finca La Esmeralda, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) ubicado en Santa Clara de Florencia, cantón de San Carlos, Provincia de Alajuela, a una altura de 170 msnm, con una temperatura media de 25.4 °C, humedad relativa media de 87% y una precipitación anual de 3600 mm, el periodo de cultivo fue de agosto a octubre del 2015.

El área del invernadero es de 270 m², con el techo cubierto con plástico de polietileno de baja densidad y filtro UV, paredes cubiertas con una malla antiáfidos (32x32 hilos por pulgada lineal), y piso cubierto con una cubierta blanca (Agritela Reflex, Arrigoni Italia).

Como material experimental se utilizaron plántulas de tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) con 14 días de edad, confeccionados en la empresa Almacigos San Juan (Naranjo, Alajuela, Costa Rica), la información acerca de los genotipos o cultivares se muestra en el cuadro 1.

Se trasplantaron 280 plántulas en contenedores de 10 litros de capacidad con sustrato de fibra de coco, a una distancia de 1,5 metros entre hileras y 0,4 metros entre plantas, se irrigaron con la solución nutritiva Universal de Steiner [7] a 2 mS/cm de conductividad eléctrica tal como se muestra en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 1. Genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) sembrado bajo cultivo protegido hidropónico en San Carlos, Costa Rica 2015-2016.

Especie	Nombre común	Cultivar	Casa Comercial	Origen
<i>Cucumis sativus</i> L.	Pepino	Monalisa F1	Semillas Este Oeste	Sud Este Asiático
		Modan RZ F1	Rijk Zwaan Ibérica S.A.	España
		Tropicuke	Seminis Vegetable Seeds	USA

Fuente: [10] [11] [12]

Cuadro 2. Proporción nutrimental de la solución nutritiva universal de Steiner [7] en porcentaje relativo y equivalentes según cada ion, para un volumen de 1000 litros de agua a una conductividad eléctrica de 2 mS/cm.

Ion	% relativo	Equivalentes
Potasio (K ⁺)	35	7
Calcio (Ca ⁺²)	45	9
Magnesio (Mg ⁺²)	20	4
Nitrato (NO ₃ ⁻)	60	12
Fosfato (H ₂ PO ₄ ⁻)	5	1
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	35	7

Cuadro 3. Valores correspondientes a equivalentes, valencia química y cantidad de sales minerales de una solución nutritiva, para un volumen de 1000 litros elaborado a partir de la propuesta de Steiner [7].

Sal mineral	Equivalentes	Valencia química	Cantidad (g)
Ca(NO ₃) ₂	9	2	738
MgSO ₄ ·7H ₂ O	4	2	303
KNO ₃	3	1	348
K ₂ SO ₄	3	2	136
KH ₂ PO ₄	1	1	240

A la solución nutritiva completa se le adicionó como fuente de elementos menores el producto Microplex® (Quelato de EDTA) a razón de 15 gramos y ácido bórico a 10 gramos en 1000 litros.

Al final del ciclo se tomaron plantas completas de cada cultivar y se enviaron al laboratorio de análisis agrónomos del ITCR, donde se realizó un análisis nutricional de tejido vegetal, así como de su peso seco por fracción vegetativa (incluye tallos, hojas y raíz) y productiva (frutos).

El diseño experimental correspondió a un irrestricto al azar con cuatro repeticiones por tratamiento (cultivares), cada repetición consistió de una hilera de 20 plantas, y el modelo fue $y_{ij} = \mu + G_i + \varepsilon_{G}$. Dónde:

y_{ij} = variable de respuesta de la ij -ésima unidad experimental

μ = media general

G = efecto i -ésimo del genotipo

ϵ_G = es el error experimental

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico JMP versión 11 de SAS Institute, se realizaron análisis de varianza y pruebas de diferencias entre medias.

Las variables evaluadas de crecimiento fueron: Altura de planta, Numero de hojas por planta, Número de frutos por planta, área foliar, índice de área foliar, peso seco de planta y frutos; de producción: número de frutos cosechados por planta, peso de frutos por planta, de calidad: grados Brix, Nutrientes minerales extraídos por planta: (N-P-K-Ca-Mg, y elementos menores).

Resultados y discusión

El ciclo de vida para los tres genotipos evaluados fue de 60 días después del trasplante (DDT), mostrando senescencia caracterizada por la presencia de hojas y tallos secos, marchitamiento y defoliación.

Análisis del crecimiento

En el cuadro 4 se presentan los datos para las variables de crecimiento de los tres genotipos de pepino evaluados, se presentaron diferencias entre el área foliar y el IAF, así como el peso seco de follaje y fruto, tanto fresco como seco. La altura de plantas fue una variable de crecimiento que no presentó diferencias entre genotipos, Gül [13] obtuvo una longitud de tallos de 283.0 cm en la época de otoño usando una fuente de nutrientes inorgánicos en sustrato de perlita más clinoptilolita para los cultivares de pepino Armada y Gordion, dato similar a lo alcanzado por los cultivares en esta investigación que oscilo entre 270 y 287 cms, Cardona [14] evaluó, bajo invernadero, con el cv Paraíso (Vitalis organic seeds) cuatro concentraciones diferentes de K en la solución nutritiva y en dos épocas diferentes (Invierno y Primavera) y reportó una altura promedio de 173.33 cm, lo que denota diferencias debido a los genotipos y su manejo nutricional.

Cuadro 4. Medias para las variables de crecimiento y producción de tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) en cultivo protegido hidropónico bajo en Santa Clara, San Carlos. 2015-2016.

Genotipo O cultivar	Altura de planta máxima (cm)	Nº Hojas/ planta máxima	Área foliar máxima (cm ²)	Índice área foliar máxima	Peso fresco (g/planta)		Peso seco (g/planta)	
					Vegetativo	Fruto	Vegetativo	Fruto
Mona lisa	270,03 ± 8,82 a	62,92 ± 5,17 a	458,61 ± 31,79 ab	6,79 ± 0,47 ab	294,86 ± 64,43 a	2001,56 ± 128,28 b	21,38 ± 3,15 ab	230,20 ± 1,31 a
Modán RZ	287,92 ± 3,55 a	61,86 ± 7,23 a	562,83 ± 30,72 a	8,34 ± 0,46 a	335,44 ± 70,27 a	2895,31 ± 170,02 a	26,68 ± 4,63 a	260,13 ± 0,42 b
Tropicuke	285,53 ± 3,81 a	82,83 ± 5,77 a	432,98 ± 16,20 b	6,41 ± 0,24 b	349,70 ± 44,16 a	2213,13 ± 102,39 b	27,76 ± 2,35 a	301,20 ± 0,44 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tuckey

El área foliar y su respectivo índice, mostraron datos mayores en el cultivar Modan RZ, que también obtuvo el mayor peso fresco de fruto, en cambio en peso seco los mayores datos de fruto y follaje los obtuvo el genotipo Tropicuke. El área foliar media obtenida para los tres genotipos oscila con lo reportado por Sánchez del Castillo *et al* [15], quien usando diferentes sistemas hidropónicos para otros cultivares de pepino en ambiente protegido, obtuvo valores de 393 a 494 cm², donde el valor más alto se obtuvo al manejar las plantas en bolsas con sustrato de arena de tezontle (arena roja volcánica) en sistema hidropónico abierto.

Ward [16] en un estudio sobre nutrición de pepino en invernadero con el híbrido Burpee cultivado en un suelo de fertilidad relativamente alta, acumuló un peso seco total de 70.50 g/planta, y fraccionado de 53.60 g/planta correspondiente a toda la parte aérea incluyendo la raíz (vegetativo) y 16.9 g/planta correspondiente a frutos para una etapa de crecimiento medio de cultivo, estos valores son prácticamente el doble a los obtenidos en esta investigación, el mismo autor reporta los pesos secos al final del ciclo de cultivo logrando alcanzar un total de 685 g/planta de materia seca, donde 148.10 g y 536.12 g corresponden a parte aérea y frutos para una planta sana y vigorosa con una producción de 12 kg de fruta planta para un ciclo de 6 meses de duración.

Sánchez del Castillo *et al.* [15] reportaron pesos secos por planta de 89.7 g en un sistema hidropónico de raíz flotante, 68.5 y 66.3 g con un sistema de recirculación de la solución nutritiva en bolsas y camas con arena de tezontle como sustrato y 79.6 y 63.2 g en un sistema sin recirculación de la solución nutritiva en bolsas y camas con el mismo sustrato para el híbrido Alcázar (Vitalis organic seeds), tales pesos fueron obtenidos a los 55 DDT manejados con la solución nutritiva propuesta por Sánchez del Castillo *et al* [15] resultando ser más elevados a los reportados en esta investigación.

Barraza [17] realizó estudios sobre la acumulación de materia seca utilizando el híbrido Saber (Vitalis organic seeds) cultivado en invernadero con tezontle rojo bajo diferentes concentraciones de la solución nutritiva Universal de Steiner [18], donde reporta valores de materia seca acumulada de 67.32 g/planta, 94.83, 95.38 y 113.31 a los 60 DDT con porcentajes de 25, 75, 125 y 175 de dicha solución nutritiva respectivamente; similares a los reportados por Sánchez *et al* [15]. Los valores de materia seca alcanzados por los cv Mona lisa, Modán RZ y Tropicuke no fueron tan altos como los reportados por [16] y [15]-[17].

Análisis de producción

Para las variables de número de frutos por planta y peso de la cosecha, se presentaron diferencias significativas, no así para el peso promedio por fruto ni los grados Brix. El genotipo con mayor producción fue Modan RZ que obtuvo más número de frutos por planta, aunque el peso por fruto fue el mismo que los otros dos cultivares, por lo que el aumento en producción se debió a un mayor número de fruto y no en aumento del peso de los mismos.

El conteo de frutos (Nº frutos por planta) inicio a los 15DDT prolongándose hasta el final del ciclo de cultivo en todos los genotipos, López *et al* [2] reporta para esta variable valores de 15.1 frutos por planta en el híbrido Camán, 16.8 para Esparón y 15 para Modán y no encontró diferencias estadísticamente significativas entre ellos, sin embargo en este caso el número de frutos por planta fue mayor en el cv Modán RZ con 15.48.

Cardona [14] obtuvo 12 frutos por planta usando una solución nutritiva con una concentración de 11.8 me L⁻¹ de K con el cv Paraíso, similar a lo alcanzado por el cv Mona lisa con 12.50 frutos por planta con una concentración menor de K (solución nutritiva de Steiner, 7 me L⁻¹), pero se disminuye la producción 8.33 frutos por planta cuando este autor utilizó 7 me L⁻¹ de K, la diferencia en concentración de K influye en la producción pero también el genotipo, ya que el Monalisa superó al cv Paraíso con la mismas concentración de K en la solución

nutritiva. Por otro lado López [19] con la variedad Luxell, produjo 6.9 frutos/planta, usando la solución nutritiva de Steiner en un ciclo de cuatro meses de duración, siendo ese un valor bajo comparándolo con la cantidad de frutos por planta alcanzado por los genotipos de esta investigación, usando la misma solución nutritiva además de presentar una diferencia en edad de 60 días aproximadamente en la duración del ciclo de cultivo.

Cuadro 5. Producción de tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) en cultivo protegido hidropónico bajo diferentes soluciones nutritivas Santa Clara, San Carlos. 2015-2016.

Genotipo o Cultivar	Nº frutos / planta	Nº frutos cosechados/planta	Peso cosecha/ Planta (g)	Peso Promedio Fruto (g)	Brix
Mona lisa	12,50 ± 1,58 ab	5,52 ± 0,47 b	2001,56 ± 128,28 b	361.97 ± 8.73 a	4,08 ± 0,36 a
Modán RZ	15,48± 2,48 a	8,44 ± 0,78 a	2895,31 ± 170,02 a	342.60 ± 5.06 a	3,60 ± 0,36 a
Tropicuke	13,86 ± 2,04 ab	6,25 ± 0,60 b	2213,13 ± 102,39 b	354.25 ± 4.85 a	3,73 ± 0,36 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tuckey

López *et al.* [2] reporta pesos de fruto en gramos de 337 en el cv Camán, 324 g en cv Esparón y 328 g en cv Modán bajo condiciones de invernadero, los cuales son similares a los obtenidos en esta investigación, que además coincide con Hochmuth y Té citados por [2], quienes evaluaron cultivares de pepino y no encontraron diferencias significativas para dicha variable.

Barraza [1] obtuvo un rendimiento acumulativo de 3.310 kg/planta usando un 25% de concentración de la solución nutritiva de Steiner [18] a los 120 DDT con el híbrido Saber, comparado con el rendimiento mínimo y máximo (2.001 y 2.895 kg/planta) alcanzado por los cultivares Mona lisa y Modán RZ respectivamente con la solución nutritiva de Steiner [7], la diferencia no fue tan superior si consideramos que hay una diferencia en edad de 60 días en su ciclo de vida.

López [19] reportó un rendimiento de 2.485 kg/planta usando la solución nutritiva de Steiner con la variedad Luxell, este valor se encuentra dentro del rango de rendimientos alcanzados por los cultivares con dicha solución nutritiva, sin embargo cabe mencionar que ese rendimiento se logró obtener en un ciclo de cultivo de cuatro meses de duración. En nuestras condiciones el ciclo de vida del cultivo es relativamente corto, pero manifiesta un potencial productivo similar a lo que otros autores reportan con ciclos de cultivos más largos, en términos de tiempo de ocupación del invernadero, al año en teoría se podrían llevar a cabo unos 6 ciclos de cultivos.

Los grados Brix presentaron un comportamiento similar entre genotipos ya que no se encontraron diferencias significativas para esta variable, López [19] evaluó soluciones nutritivas sobre la producción y calidad usando el cv Luxell, reportando un contenido de sólidos solubles de 4.2 utilizando la solución nutritiva de Steiner, valor que supera ligeramente a lo alcanzado por los frutos del cv Mona lisa usando esta misma solución nutritiva. Cardona [14] reporta un valor de 4.4 °Brix en los frutos del cv Paraíso con la solución nutritiva de Steiner [7].

Análisis de absorción de macronutrientes

El cuadro 6 contiene los resultados totales de macronutrientes absorbidos por planta en gramos, fraccionado en parte vegetativa y frutos para cada uno de los genotipos de pepino evaluados.

Cuadro 6. Extracción de macronutrientes por tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) en cultivo protegido hidropónico Santa Clara, San Carlos. 2015-2016.

Genotipo o cultivar	Fracción	g/planta				
		N	P	K	Ca	Mg
Mona lisa	Follaje	0,82 ± 0,07 a	0,15 ± 0,02 a	1,49 ± 0,25 ab	0,85 ± 0,16 abc	0,24 ± 0,05 ab
	Fruto	1,07 ± 0,05 ab	0,17 ± 0,010 ab	1,96 ± 0,10 a	0,22 ± 0,02 ab	0,13 ± 0,007 a
	Total	1,67 ± 0,10 ab	0,32 ± 0,04 ab	3,45 ± 0,30 ab	1,07 ± 0,18 ab	0,37 ± 0,06 a
Modán RZ	Follaje	0,81 ± 0,13 a	0,16 ± 0,02 a	1,82 ± 0,30 a	1,00 ± 0,18 ab	0,28 ± 0,05 ab
	Fruto	0,58 ± 0,03 c	0,09 ± 0,005 c	1,06 ± 0,06 b	0,14 ± 0,02 bc	0,08 ± 0,004 a
	Total	1,39 ± 0,16 bc	0,25 ± 0,02 b	2,88 ± 0,34 b	1,14 ± 0,19 ab	0,36 ± 0,05 a
Tropicuke	Follaje	0,60 ± 0,06 a	0,17 ± 0,02 a	1,93 ± 0,13 a	1,03 ± 0,11 a	0,31 ± 0,03 a
	Fruto	1,16 ± 0,04 a	0,20 ± 0,005 a	2,25 ± 0,08 a	0,29 ± 0,01 a	0,16 ± 0,009 a
	Total	1,98 ± 0,08 a	0,37 ± 0,02 a	4,18 ± 0,07 a	1,32 ± 0,11 a	0,47 ± 0,02 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tuckey

El orden de absorción de macronutrientes para todos los genotipos fue el siguiente $K > N > Ca > Mg > P$. Ward [16] quien cultivo en suelo bajo invernadero el híbrido Burpee obtuvo un orden de absorción de $K > N > Ca > P > Mg$, difiriendo únicamente en que se absorbió más P que Mg.

Entre cultivares las cantidades absorbidas de N, P y K fueron más altas para los cv Tropicuke y Mona lisa con respecto al cv Modán RZ, para el Ca y Mg la absorción fue similar en todos los cultivares.

La fracción vegetativa (parte aérea + raíz) al igual que el total de la planta (vegetativa + fruto) logro acumular mayor cantidad de macronutrientes, entre genotipos no se encontraron diferencias de absorción de macronutrientes para esta porción de la planta.

Entre cultivares las cantidades absorbidas de N fueron mayores en los cv Tropicuke y Mona lisa respecto al cv Modán RZ, para el P y K fue mayor su acumulación en el cv Tropicuke, seguido del cv Mona lisa y del cv Modán RZ, por otra parte el Ca y Mg no mostraron diferencias entre genotipos en cuanto a la cantidad acumulada en sus frutos.

En general el orden de absorción de macronutrientes tanto en follaje como en fruto para los tres cultivares fue $K > Ca > N > Mg > P$, lo que concuerda con Ward [16] donde K-Ca y K-N son los

nutrientes más absorbidos, sin embargo el orden de absorción precisamente no es el mismo puesto que este autor reporta al Ca>K>N>Mg>P para la parte aérea donde el Ca se absorbió en mayor cantidad con respecto al K y para los frutos obtuvo un orden de K>N>P>Ca>Mg donde el P se absorbió en mayor cantidad con respecto al Ca.

El contenido de N, P y K acumulado fue mayor en la porción de los frutos de todos los genotipos, excepto para el cv Modán RZ donde su absorción fue mayor en la fracción comprendida como follaje, de igual manera el Ca y Mg se acumuló mayormente en la porción follaje para todos los cultivares con ambas soluciones nutritivas.

Considerando que se utilizó una densidad de siembra de 16.675 plantas/ha durante 60 DDT, la absorción total en kilogramos por hectárea utilizando la solución nutritiva Universal de Steiner fue 27.85 de N, 5.34 de P, 57.53 de K, 17.84 de Ca y 6.17 de Mg en el cv Mona lisa, 23.18 kg/ha de N, 4.17 de P, 48.02 de K, 19.01 de Ca y 6.00 de Mg en el cv Modán RZ y 33.02 kg/ha de N, 6.17 de P, 69.70 de K, 22.01 de Ca y 7.84 de Mg en el cv Tropicuke, destacándose para todos los macronutrientes una absorción total por planta mayor en el cv Tropicuke, en suelo Casaca *et al.* [20] reportan una extracción de nutrientes de 57 kg/ha de N, 43 kg/ha de P y 86 kg/ha de K y Ward [16] bajo invernadero y en suelo obtuvo resultados mayores a los alcanzados por los cv Mona lisa, Modán RZ y Tropicuke registrando un promedio de 262.13 Ton/ha y una absorción total de macronutrientes de 408 kg/ha de N, 92 de P, 550 de K, 237 de Ca y 57 de Mg para un ciclo de 6 meses de duración.

Análisis de absorción de micronutrientes

En el cuadro 7 se presentan los datos de absorción de micronutrientes para los tres genotipos evaluados, los datos están en partes por millón (ppm) o mg/Kg

Cuadro 7. Extracción de micronutrientes por tres genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) en cultivo protegido hidropónico Santa Clara, San Carlos. 2015-2016.

Cultivar	Fracción	Ppm			
		Cu	Mn	Fe	Zn
Mona lisa	Follaje	11,75 ± 1,03 b	69,50 ± 3,77 a	82,75 ± 6,14 ab	63,50 ± 2,60 b
	Fruto	13,00 ± 1,47 a	28,50 ± 2,96 abc	104,25 ± 4,68 abc	58,50 ± 4,21 a
	Total	24,75 ± 1,89 b	98,00 ± 6,20 a	187,00 ± 10,50 abc	122,00 ± 6,72 b
Modán RZ	Follaje	12,00 ± 0,41 b	82,50 ± 5,50 a	82,75 ± 8,34 ab	58,50 ± 1,85 b
	Fruto	13,25 ± 1,38 a	30,75 ± 1,38 ab	139,50 ± 36,42 a	59,25 ± 4,05 a
	Total	25,25 ± 1,60 b	113,25 ± 5,72 a	222,25 ± 40,62 ab	117,75 ± 3,88 b
Tropicuke	Follaje	12,50 ± 0,96 b	73,00 ± 4,69 a	101,25 ± 10,69 a	53,00 ± 6,65 b
	Fruto	12,25 ± 1,44 a	35,00 ± 2,97 a	125,00 ± 12,31 ab	60,50 ± 3,28 a
	Total	24,75 ± 2,02 b	108,00 ± 6,75 a	226,25 ± 16,27 a	113,50 ± 8,21 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tuckey

Los valores de absorción de micronutrientes acumulados en los diferentes genotipos de pepino no mostraron diferencias estadísticamente significativas, algunos micronutrientes fueron cuantitativamente más altos, por ejemplo el Fe fue absorbido en mayor cantidad, caso contrario

ocurrió con el Cu que fue el elemento menor que menos se absorbió, por último el Mn fue similarmente absorbido para todos los genotipos y en niveles similares también el Zn. El orden de absorción de micronutrientes total por genotipo fue el siguiente Fe>Zn>Mn>Cu.

Tzerakis *et al.* [21] estimó la absorción de Mn y Zn en pepino usando el cv Myrthos RZ en un sistema hidropónico cerrado con recirculación de la solución nutritiva, evaluó diferentes concentraciones de Mn y Zn para conocer la influencia de estos micronutrientes sobre la absorción de la planta mediante dos métodos. Concluyendo que las absorciones más altas se dieron al usar las concentraciones más altas de Mn y Zn, llegando a estabilizarse a los 70 DDT como respuesta ante una entrada constante de sales en la solución nutritiva.

Conclusiones

La absorción de macronutrientes acumulada en las plantas de pepino de los cultivares Monalisa, Modán RZ y Tropicuke presentó el siguiente orden (K>N>Ca>Mg>P)

La absorción de micronutrientes acumulada en las plantas de pepino de los cultivares Monalisa, Modán RZ y Tropicuke fue similar y presentó el siguiente orden Fe>Zn>Mn>Cu.

El crecimiento en las plantas pepino de los cultivares Monalisa y Tropicuke mostró una disminución en la altura máxima (270,03 cm y 285,53 cm respectivamente) al usar la solución nutritiva Ajustada, correspondiente a 226,09 cm y 221,72 cm respectivamente.

El cv Modán RZ alcanzó el máximo rendimiento (2,895 Kg/planta), seguido del cv Tropicuke (2,213 kg/planta) y del cv Monalisa (2,001 kg/planta).

El contenido de sólidos solubles en los frutos de los cultivares Monalisa, Modán RZ y Tropicuke fue de 2,80 °Brix a 4,08 °Brix.

Recomendaciones

Evaluar otros genotipos existentes en el mercado con mejor adaptación a la región Huetar Norte de Costa Rica.

Evaluar otras soluciones nutritivas y otros sustratos con el fin de obtener la combinación que mejor se adapte a las condiciones particulares del trópico húmedo.

Referencias

- [1] C. Ramírez, J. Nienhuis. Cultivo protegido de hortalizas en Costa Rica. Tecnología en Marcha 25(2): 10-20 p, 2012.
- [2] E. López, J. Rodríguez, M. Huéz, M, S. Garza, J. Jiménez, E. Leiva. Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda. Scielo 29(2): 21-27p, 2011.
- [3] N. Castilla. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 462p, 2004.
- [4] D. Moreno, B. Hernández, D. Barrios, A. Ibáñez, W. Cruz, R. Berdeja. Calidad poscosecha de frutos de pepino cultivados con diferente solución nutritiva. Mexicana de Ciencias Agrícolas 6(3): 637-643p, 2015.
- [5] C. Reyes. Dinámica nutricional y rendimiento de pepino en sistemas hidropónicos con recirculación de la solución nutritiva. Tesis Maestría en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp 19, 2012.
- [6] E. Favela, P. Preciado, A. Benavides. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Navarro. 2006.

- [7] A. Steiner. The universal nutrient solution. Sixth international congress on soilless culture, Lunteren, Netherlands. Publicado por International Society for Soilless Culture (ISOSC). Wageningen, Holanda. 633-649 p, 1984.
- [8] Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG), Cultivos agrícolas. Hortalizas, pepino. (en línea). Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-pepino.pdf, 2014.
- [9] L. Calvo. Evaluación de cultivares de pepino (*Cucumeris sativus*) en la estación experimental Enrique Jiménez Núñez. Investigación Agrícola, Costa Rica 1(1): 22-23p, 1987.
- [10] Rijk Zwaan. Productos y servicios. Pepino Modan RZ F1 (en línea). Consultado el 08 de febrero del 2016. Disponible en: <http://www.rijkszwaan.es>, 2016.
- [11] East-West Seed Group. Productos, pepino Monalisa F1 (en línea). Consultado el 08 de febrero del 2016. Disponible en: <http://www.eastwestseed.com>, 2011.
- [12] Trisan Agro. s.f. Catálogo semillas, Pepino Tropicuke II (en línea). Consultado el 08 de febrero del 2016. Disponible en: <http://trisanagro.com/product/pepino-tropicuke-ii/>, 2016.
- [13] A. Gül, F. Kidoglu, D. Anac. Effect of nutrient sources on cucumber production in different substrates. Elsevier. Scientia Horticulturae 113: 216-220 pp. 2007.
- [14] B. Cardona. Efecto del potasio sobre la calidad y el rendimiento del fruto de pepino (*Cucumis sativus* L.) desarrollado en un sistema hidropónico. Tesis Ing. Agr en Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. pp 38-56, 2015.
- [15] F. Sánchez, L. Gonzales, E. Moreno, J. Pineda, E. Reyes. Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. Fitotecnia Mexicana 37(3): 261-269p, 2014.
- [16] G. Ward. Greenhouse cucumber nutrition a growth analysis study. Ontario, Canada. Plant and Soil vol. XXVI (2): 324-332 p, 1967.
- [17] F. Barraza. Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. Montería, Colombia. Temas Agrarios 17(2):18-29 pp, 2012.
- [18] A. Steiner. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Netherlands. Plant and Soil 15(2): 134-154 p, 1961.
- [19] G. López. Soluciones nutritivas orgánicas en la producción y calidad del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero. Tesis Maestro en Ciencias Agrarias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. pp 51-54, 2014.
- [20] A. Casaca, E. Sierra, J. Cruz, R. Arellano, M. Jiménez y S. Flores. El cultivo del pepino (*Cucumis sativus*) (en línea). Consultado el 23 de Julio del 2015. Disponible en: <http://gamis.zamorano.edu/gamis/es/Docs/hortalizas/pepino.pdf> 2005.
- [21] C. Tzerakis, D. Savvas, N. Sigrimis, G. Mavrogiannopoulos. Uptake of Mn and Zn by Cucumber grown in closed hydroponic systems as influenced by the Mn and Zn concentrations in the supplied nutrient solution. HortScience 48(3): 173-179 pp, 2013.

Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México

Baseline calculation of greenhouse gases emissions and future projections for the transport sector in the state of Veracruz, Mexico

María Concepción Martínez-Rodríguez¹, Lorena Elizabeth Campos-Villegas², José Jesús Castillo-Monroy³

Fecha de recepción: 18 de abril de 2018

Fecha de aprobación: 19 de junio de 2018

Martínez-Rodríguez, M; Campos-Villegas, L; Castillo-Monroy, J. Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 118-133.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4123>

1 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Ciudad de México, México. Correos electrónicos: mconcepcionmr@yahoo.com.mx; mcmartinezr@ipn.mx

2 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Ciudad de México, México.

3 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Ciudad de México, México.



Palabras clave

Energía; calentamiento global; economía ecológica; contaminación del aire; regulación ambiental.

Resumen

El transporte en el Estado de Veracruz-México, representa el tercer sector en el consumo de energía y el de mayor crecimiento en emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), el cálculo de la línea base o escenario tendencial mediante el modelo Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP) en el periodo 2010-2026 reporta un rango de 10.3 millones de TonCO₂e a 15.3 millones de TonCO₂e respectivamente, derivado de los consumos de gasolina y diésel principalmente. Los escenarios planteados se relacionan con la penetración de vehículos a diésel, así como de vehículos híbridos, uso de etanol como combustible y disminución del uso de automóvil particular como los camiones para pasajeros y camiones para carga. El impulso de estos escenarios tiene el potencial de reducir las emisiones de combustibles para el año 2026 en una cantidad equivalente a más del 15% del total de emisiones durante el periodo 2010-2026.

Keywords

Energy; global warming; ecological economics; air pollution; environmental regulation.

Abstract

Transport in the State of Veracruz-Mexico represents the third sector in energy consumption and the fastest growing emissions of Greenhouse Gases, the calculation of the baseline or trend scenario using the Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP) model in the period 2010-2026 reports a range of 10.3 million to 15.3 million tonCO₂e tonCO₂e respectively, arising from the consumption of gasoline and diesel mainly. The scenarios presented are related to the penetration of diesel vehicles and hybrid vehicles, use of ethanol fuel and reducing the use of private cars and trucks for passengers and cargo trucks. The momentum of these scenarios has the potential to reduce fuel emissions for the year 2026 in an amount equivalent to more than 15% of total emissions for the period 2010-2026.

Introducción

El cambio climático actualmente representa uno de los mayores desafíos de la humanidad, y uno de los principales factores que incide sobre este fenómeno es la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debido a las actividades inherentes a los procesos de producción [1].

La liberación de GEI derivado de la quema de combustibles fósiles tiene efectos irreversibles sobre el clima mundial de acuerdo a estudios del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Ante este paradigma, empresas, industrias y comunidades reclaman la identificación, reducción y evaluación del impacto ambiental de las emisiones GEI derivado de los procesos de creación, transformación, transporte, almacenamiento, reciclaje o disposición de bienes y servicios [2].

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) ha establecido que para lograr estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera, todos los países, y en

particular los países de renta media como México, deben, como parte de sus compromisos frente al tema, elaborar e implementar estrategias de desarrollo bajo en emisiones.

En este contexto, México ha elaborado una estrategia de desarrollo bajo en emisiones (MLED), teniendo como objetivo destacado reducir significativamente las emisiones GEI del país. Por esto, recientemente se publicó en México la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en la que se establecen acciones y responsabilidades compartidas por los tres niveles de gobierno para la elaboración y aplicación de políticas públicas, como parte de la gestión ambiental ante la adaptación al cambio climático y la reducción de GEI. En esta Ley se destaca que se debe ir hacia un desarrollo económico bajo en carbono y señala como objetivo la reducción de emisiones provocadas por la generación y uso de energía.

Lo mencionado anteriormente da pauta al desarrollo de investigaciones para conocer el impacto que tendrá el consumo de combustibles fósiles en el sector transporte, así como sus emisiones GEI, en el presente y futuro. Esto permitirá crear escenarios de mitigación en función del comportamiento de un escenario tendencial o *business as usual (BAU)*.

Este documento, es parte del instrumento para la gestión ambiental en materia de emisiones GEI en el Estado de Veracruz para el sector transporte, con la premisa de tener una mejor comprensión de la dimensión de sus emisiones presentes y futuras por consumos de combustibles, así como identificar áreas de oportunidad en el potencial de reducción de la emisiones GEI. El cálculo de la línea base y sus proyecciones de emisiones GEI se centran en los datos del inventario estatal del Estado de Veracruz para el sector transporte.

Entre los objetivos que se tienen en la presente investigación tenemos: Calcular la línea base de los GEI y su proyección a futuro para el sector Transporte del Estado de Veracruz, México, establecer el escenario tendencial de las emisiones de GEI en términos de CO₂e (Bióxido de carbono equivalente) en el sector transporte para la identificación del potencial de emisión en el periodo 2010-2026, identificar con base al escenario tendencial el subsector de transporte con mayor impacto en la generación de emisiones GEI por uso de combustibles fósiles, plantear escenarios de mitigación para el subsector transporte con mayor potencial de emisiones GEI en términos de CO₂e, identificación, reducción y evaluación del impacto ambiental de las emisiones GEI derivado de los procesos de creación, transformación, transporte, almacenamiento, reciclaje o disposición de bienes y servicios.

Antecedentes

Planteamiento del problema

Derivado de USAID (Agencia Internacional de Estados Unidos para el Desarrollo) [3], las regiones en vías de desarrollo, como el estado de Veracruz, presentan una capacidad adaptativa reducida en relación a los efectos del aumento en la temperatura a largo plazo. Esto se debe a los bajos niveles económicos; la falta de infraestructura física y social, especialmente en salud y educación; la escasez de tecnología; el bajo nivel de eficiencia y confianza en las instituciones y servicios que prestan a la sociedad; la falta de información y conocimientos, y finalmente la desigualdad social y la pobreza que impide la equidad en la distribución de los beneficios sociales. Por ello, uno de los objetivos de estas regiones debe ser aumentar el desarrollo socioeconómico, lo cual ampliará la capacidad de adaptación de los habitantes de las comunidades y los hará menos vulnerables al cambio climático. No obstante, es claro que ese desarrollo económico implica el aumento en el consumo de energía y las emisiones GEI, aunque estas pueden mitigarse mediante el aprovechamiento de fuentes alternas y el uso más eficiente de la energía.

Con base en USAID [3], las emisiones GEI en Veracruz han aumentado entre 1990 y 2005 de 180% a 400%. Las emisiones estimadas en CO₂e representan cerca de 3.5% del total nacional reportado en el inventario nacional, y provienen de la generación de energía, la agricultura, la ganadería y desechos.

En el balance nacional de energía 2005 se afirma que la región donde se localiza el Estado de Veracruz concentra la mayor parte de la energía primaria (90.5%), mientras que a los procesos de transformación corresponden al 61%. Veracruz contribuye con cerca del 20% a la generación nacional de energía eléctrica, principalmente a partir de combustibles fósiles.

Del total de las emisiones GEI provenientes de los sectores de generación de energía, agricultura, ganadería y desechos, el bióxido de carbono (CO₂) es el que más contribuye a estas emisiones aportando entre 62.4 y 67.3 % en 2003, seguido del metano (CH₄) que aportó entre 32.6 y 37.6 % en 2004 y, por último, el óxido nitroso (N₂O) con una contribución de 0.1% a lo largo del periodo referido.

Acciones hacia la mitigación y vulnerabilidad ante el cambio climático

Derivado de los compromisos que México ha asumido en los últimos años ante la UNFCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), se han ejecutado acciones en materia de política pública relacionada a cambio climático a nivel federal, permitiendo abrir compromisos en todos los niveles de gobierno: federal, estatal y municipal. En este contexto, la mayor parte de la política pública en materia de cambio climático se ha enfocado a nivel federal, aunque a nivel estatal y municipal han surgido algunas iniciativas.

El Estado de Veracruz cuenta con tres inventarios estatales para los años 2004, 2008 y 2010. Este último es un inventario con mayor alcance en las estimaciones de GEI, puesto que considera todas las categorías de energía (industria de la energía, refinación de petróleo, industrias manufactureras y de la construcción y transporte y otros sectores). Con relación a los avances en políticas estatales de cambio climático, Veracruz es uno de los estados que está clasificado dentro de un nivel avanzado, destacando su Ley Estatal de Mitigación y Adaptación ante los Efectos del Cambio Climático del Estado de Veracruz [4]. Se destaca también como un estado que cuenta con un Programa Estatal de Cambio Climático (PECC), así como uno de los que ha conformado arreglos transversales de atención al tema de cambio climático y quien ha manifestado interés en el programa MLED (Mexico Low Emissions Development). Asimismo, en 2010, se publicaron las Agendas Sectoriales de Cambio Climático del Estado de Veracruz 2012-2016, entre las medidas que se establecen destacan las del sector transporte en la reducción de emisiones de GEI. Por consiguiente, conocer los consumos actuales de energéticos en este sector, permite obtener estimaciones y tendencias de usos en el futuro.

De acuerdo a las bases del MLED, el consumo de combustibles fósiles para el transporte es la mayor fuente de emisiones GEI en México (145 MtCO₂e en 2006). Entre 1990 y 2000, la tasa promedio de crecimiento de las emisiones relacionadas con consumo de combustibles para autotransporte fue 2.6 % anual, y se incrementó a 5.8 % anual entre 2000 y 2008. Entre 1990 y 2008 las emisiones relacionadas a transporte se duplicaron. Esto hace de la eficiencia energética en este subsector un tema prioritario para México, y en específico para sus entidades y municipios [5]. De acuerdo con datos históricos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), se estima que el parque vehicular del estado de Veracruz crecerá a una tasa media de crecimiento anual del 6.2 %.

Es importante destacar que en el Plan Veracruzano de Desarrollo (PVD) 2011-2016 se destaca que el transporte aporta el 8.1 % del PIB del Estado, encontrándose por arriba del promedio nacional. También, de acuerdo con el inventario 2010 del Estado de Veracruz, los principales usos de energéticos se encuentran en tres sectores: 39 % en la industria del petróleo, 25 %

en la generación de energía eléctrica y 18 % en el sector transporte. Las principales fuentes de energía de este último sector son las gasolinas y el diésel, así como de turbosina y Gas LP. De acuerdo con el Programa de Acción Climática Veracruzano, a pesar de que en materia de generación de electricidad y uso de combustibles fósiles es poco lo que puede hacer el estado para emprender acciones de lucha contra el cambio climático, sí puede actuar en materia de transporte. Entre sus estrategias se destaca, incentivar la utilización del sistema de transporte de baja emisión de contaminantes, como mejorar las tasas de rendimiento de uso de combustibles por km/l, así como la introducción de combustibles menos agresivos al ambiente.

Metodología

Con la finalidad de cumplir con los objetivos, a continuación se desglosa el proceso metodológico llevado a cabo para las proyecciones de las emisiones de GEI:

1. Investigar datos clave como consumos energéticos y modos de transporte del Estado de Veracruz derivado de informaciones oficiales y públicas como prospectivas económicas, energéticas, entre otras.
2. Analizar el último inventario de emisiones de GEI del Estado de Veracruz.
3. Configurar el año base en la herramienta LEAP.
4. Desarrollar el escenario energético: tendencial o *BAU*.
5. Implementar en el modelo LEAP la prospectiva energética para el periodo 2010-2026 y realizar el análisis de los resultados obtenidos en relación a los consumos energéticos y sus correspondientes emisiones GEI.
6. Definir escenarios de mitigación para el subsector con mayor impacto de emisiones por consumos de combustibles.

Identificación de variables

En el marco del cálculo de las emisiones de GEI en el proceso del sector transporte, se involucran diversas variables a considerar. Las cuales se describen a continuación:

El escenario socioeconómico

El Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, tiene una superficie de 71,820 km², con una extensión máxima de noroeste a sudeste es de 800 kilómetros de largo y 212 kilómetros de ancho, mientras que la mínima es de 32 kilómetros de anchura. Este Estado ocupa el lugar 11 a nivel nacional por ser de las entidades más grandes de la República Mexicana.

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, efectuado por el INEGI [6], la población de todo el Estado es de 7, 712, 247 habitantes, de las cuales el 78% de la población vive en localidades urbanas y el 22% en rurales. Con base en los datos de la CONAPO (Consejo Nacional de Población) se estima que la población en 2026 será de 8, 781,620 con una tasa de crecimiento promedio anual del 0.65 %.

En 2010, el PIB del Estado fue de 634,286 millones de pesos a precios constantes, las actividades terciarias aportaron el 53.6 %, seguidas por las actividades secundarias con 42 %, y las actividades primarias 4.4 %. Dentro de las actividades terciarias se desglosan el sector transporte, correos y almacenamiento, el PIB de este sector representa el 6.6 % del PIB estatal y el 12.4 % del PIB de las actividades terciarias. Con base al cálculo realizado con un historial del PIB del estado, se estima que se tenga un crecimiento del 3 % anual en los próximos años.

En la figura 1, se muestra una representación esquemática del papel del escenario económico en el contexto del estudio.

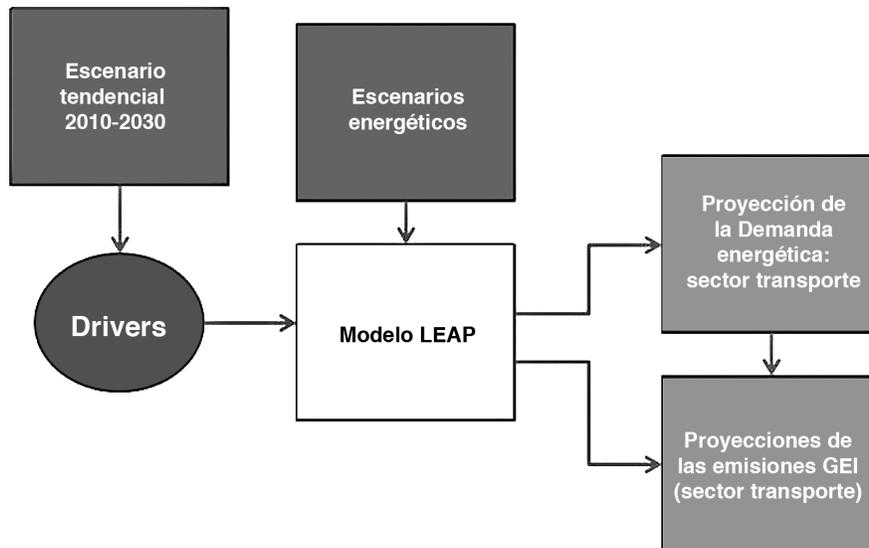


Figura 1. Escenario tendencial para el sector transporte.

Sistema energético en Veracruz en el sector transporte

De acuerdo con el inventario de emisiones GEI del Estado de Veracruz 2010, las estimaciones de las emisiones fueron de acuerdo a tres categorías: Agrícola, emisiones fugitivas y energía, esta última incluye las subcategorías de consumo de energía, refinación de petróleo, industria manufacturera, transporte, residencial y comercial. En el año 2010, para satisfacer la demanda de los sectores antes mencionados, se comercializó un total de aproximadamente 772 petajoules (PJ) de energía, de los cuales aproximadamente 141 PJ corresponde al sector transporte, que representa al 18 % del consumo total de energía.

El transporte carretero se satisface básicamente con las gasolinas y diésel, en conjunto hacen un consumo energético de casi el 17 % del total estatal. Con más de 2.5 millones de m³ anuales de gasolina y más de 1.3 millones de litros de diésel, satisfacen la demanda de 1.51 millones de unidades vehiculares en el estado.

El estado cuenta con 4 aeropuertos, consumiendo un total de 169 mil m³ de turbosina. Existen también cuatro puertos, tanto de altura como de cabotaje, en los cuales se consumen 130 mil m³ de diésel. La aviación y navegación del estado consumen una pequeña proporción de la energía, con tan solo el 1.4 % del total [7].

Herramienta para proyección de emisiones de GEI

long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP) [8]

Usualmente se utilizan modelos económicos energéticos para pronosticar cuáles serán los consumos futuros, la oferta que atienda la demanda y los impactos ambientales derivados de diversas combinaciones. LEAP es una plataforma computacional diseñada para llevar a cabo una planeación energético-ambiental en forma integrada. Se basa en los siguientes escenarios:

- Prospectiva energética (*forecasting*)
- Planeación integrada de los recursos
- Análisis de política energética
- Análisis de mitigación de gases de efecto invernadero
- Balances energéticos e inventarios ambientales

Su principal objetivo es brindar un soporte integrado y confiable en el desarrollo de estudios de planeación energética integrado, que permite identificar y evaluar opciones de política y tecnologías alternativas.

- Para el desarrollo de LEAP se requiere datos como:
- Balance energético del año base
- Precios de los distintos productos energéticos
- Parámetros tecnológicos
- Costos por cada tecnología
- Proyecciones internacionales de precios de energía
- Coeficientes ambientales locales (opcional)
- Intensidades energéticas para procesos de uso final
- Información sobre usos de biomasa

Elementos para definir el escenario tendencial

Variables del escenario tendencial

En primer lugar, el estudio se basa de un escenario energético del sector transporte de Veracruz, y se plantea un escenario para el periodo 2010-2026, denominado Tendencial (*BAU*).

Con respecto a la demanda de gasolina y turbosina en el Estado de Veracruz, en el cuadro 1, se desglosa la prospectiva de este tipo de combustible al 2026. Estos datos fueron configurados en LEAP para estimar las proyecciones al 2026 a partir del año base 2010.

La información de consumo del gas LP por sector se dispone en el Balance Nacional Energético (BNE) y el PIB nacional, y por sector se encuentra disponible en el INEGI. En base a una guía para realizar balances energéticos [10], se sugiere estimar los consumos de combustibles en el sector transporte de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_{te}GLP_{to} = \frac{E_tGLP_{nacto}}{A_{nacto}} \cdot A_{estto}$$

Donde:

$E_{te}GLP_{to}$: es el consumo de GLP para el sector t (transporte) en el estado para el año to.

E_tGLP_{nacto} : es el consumo nacional de GLP para el sector t (transporte) para el año to.

A_{nacto} : es el número de automóviles nacionales para el to.

A_{estto} : es el número de automóviles estatales para el to.

Cuadro 1. Prospectiva de demanda interna de gasolina y turbosina, 2011-2026.

Año	Tipos de combustible [TJ]	
	Gasolinas	Turbosinas
2011	80,927.62	2808.13
2012	84,276.35	3886.62
2013	91,717.97	4049.4
2014	95,624.82	4151.15
2015	100,647.91	4293.59
2016	105,857.04	4436.03
2017	110,694.10	4578.47
2018	115,531.15	4700.56
2019	120,182.16	4843
2020	124,275.05	4985.44
2021	128,553.99	5127.89
2022	132,088.76	5270.33
2023	136,553.73	5412.77
2024	140,460.58	5575.56
2025	144,553.47	5738.35
2026	148,646.36	5901.14

Fuente: Prospectiva de Petrolíferos 2010-2026 [9].

En el cuadro 2 se presentan las ventas internas de diésel en el estado.

Cuadro 2. Ventas internas de diésel-autotransporte, 1998-2010.

Año	Ventas internas de diésel-autotransporte, 1998-2010	
	Miles de barriles diarios	Terajoules [TJ]
1998	15.2	30,087.43
1999	16.24	32,157.12
2000	15.04	29,791.15
2001	14.96	29,634.87
2002	15.3	30,303.72
2003	16.21	32,093.84
2004	17.29	34,244.80
2005	18.07	35,788.90
2006	19.55	38,718.74
2007	20.82	42,960.49
2008	21.11	45,854.49
2009	21.3	44,261.11
2010	21.58	44,757.59

Fuente: Elaboración propia con datos de www.sie.energia.gob.mx

En el cuadro 3 se presentan las estimaciones realizadas.

Cuadro 3. Consumo de GLP, 2005-2010.

Año	Consumo [TJ]
2005	2,251.69
2006	1,777.78
2007	2,176.13
2008	1,991.49
2009	1,927.23
2010	1,986.89

Fuente: Creación propia derivada de Guías de balances energéticos estatales [11].

Factores de emisión (FE)

Los FE utilizados para el cálculo de las emisiones de GEI en esta proyección de la línea base se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Factores de emisión por tipo de combustible.

Tipo de transporte	Combustible	Factores de emisión [Kg/TJ]		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Terrestre	Gasolinas	69,300	25	8
	Diésel	74,100	3.9	3.9
	Gas LP	63,100	62	0.2
Ferroviano	Diésel	74,100	4.15	28.6
Marino	Diésel	74,100	7	2
Aéreo	Queroseno	71,900	3	0.6

Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change [12].

Resultados de la proyección de la línea base

Proyección energética

El consumo de combustibles en el sector transporte puede observarse una tendencia de crecimiento durante el periodo de cálculo. En 2010, la cantidad de combustible para este sector representa 140,700 TJ y para el 2026 con el escenario tendencial se estima sea de 209,000 TJ, es decir un 48.5 % más con respecto al año base. El subsector con mayor consumo es el autotransporte.

Con respecto al año base, el consumo de combustible para este subsector es de aproximadamente el 90 % del total en ese sector. El cuadro 5, muestra la distribución porcentual por subsector.

Cuadro 5. Participación del consumo de combustibles en el sector transporte [%]

Año	Tipo de transporte				Total
	Autotransporte	Marítimo	Ferroviario	Aéreo	
2010	90.4	3.3	2.1	4.2	100
2012	91.9	3.3	2.1	2.7	100
2014	92.3	3	2	2.7	100
2016	92.7	2.8	1.8	2.7	100
2018	92.9	2.7	1.7	2.7	100
2020	93.1	2.5	1.6	2.7	100
2022	93.3	2.4	1.6	2.7	100
2024	93.4	2.3	1.5	2.8	100
2026	93.5	2.2	1.4	2.8	100
2028	93.5	2.2	1.4	2.8	100
2030	93.5	2.2	1.4	2.8	100

Proyección de emisiones GEI

Con relación al consumo total de energéticos en el sector transporte, es evidente que tiene una relación con la tendencia de emisiones de CO₂e. En 2010 se estimaron 10.34 Millones de ton CO₂e y en base al escenario tendencial se estima que las emisiones asciendan a 15.3 Millones de ton CO₂e en 2026, es decir aproximadamente 48 % más en comparación al año base. En la figura 2 se muestra la proyección de la línea base y se observa una tendencia de crecimiento de las emisiones de CO₂e por modo de transporte.

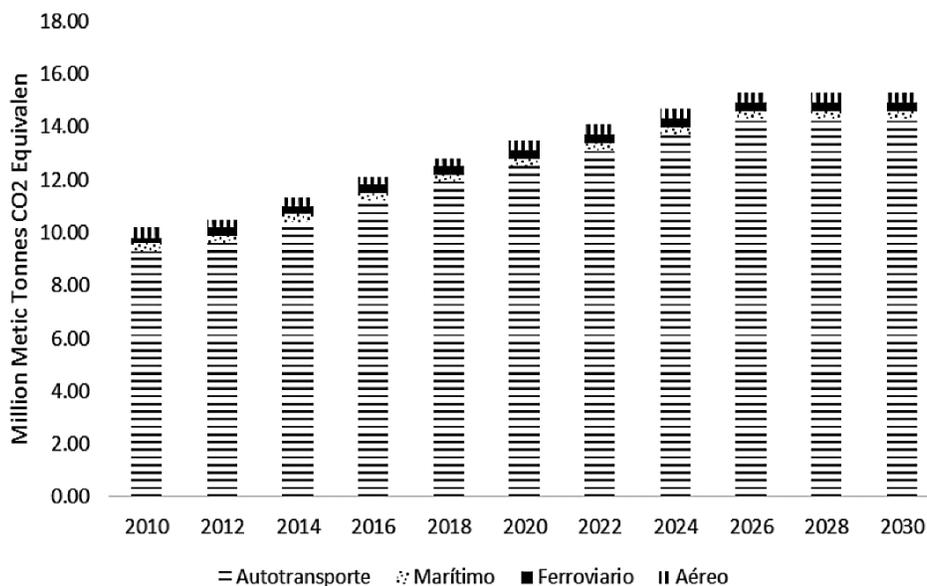


Figura 2. Emisiones de CO₂e para los diferentes subsectores del transporte.

Con respecto a las emisiones de CO₂e por tipo de combustibles, en el cuadro 6 se muestra la tendencia en valores absolutos de las emisiones de CO₂e. La cual muestra que la gasolina y el diésel son los combustibles con mayor participación de emisiones GEI, en el presente y futuro.

Cuadro 6. Emisiones de GEI en el periodo 2010-2026 (Millones de ton CO₂e)

Año	Combustible				Total
	Diésel	Gasolina	Gas LP	Queroseno	
2010	4	5.8	0.1	0.4	10.3
2012	4	6.1	0.1	0.3	10.5
2014	4	6.9	0.1	0.3	11.3
2016	4	7.7	0.1	0.3	12.1
2018	4	8.4	0.1	0.3	12.8
2020	4	9	0.1	0.4	13.4
2022	4	9.6	0.1	0.4	14
2024	4	10.2	0.1	0.4	14.7
2026	4	10.7	0.1	0.4	15.3
2028	4	10.7	0.1	0.4	15.3
2030	4	10.7	0.1	0.4	15.3

En el cuadro 7 se muestra las tendencias de emisiones de CO₂e por subsector. En la cual se puede observar que las emisiones en 2026 para el sector autotransporte representan un incremento de aproximadamente el 54 % con respecto al año base.

Cuadro 7. Emisiones de GEI por subsector (Millones de ton CO₂e)

Año	Tipo de transporte				Total
	Autotransporte	Marítimo	Ferroviario	Aéreo	
2010	9.3	0.3	0.2	0.4	10.3
2012	9.6	0.3	0.3	0.3	10.5
2014	10.4	0.3	0.3	0.3	11.3
2016	11.2	0.3	0.3	0.3	12.1
2018	11.9	0.3	0.3	0.3	12.8
2020	12.5	0.3	0.3	0.4	13.4
2022	13.1	0.3	0.3	0.4	14
2024	13.7	0.3	0.3	0.4	14.7
2026	14.3	0.3	0.3	0.4	15.3
2028	14.3	0.3	0.3	0.4	15.3
2030	14.3	0.3	0.3	0.4	15.3

Por otra parte, es importante destacar, que la gasolina es el principal combustible que genera emisiones de CO₂e para el subsector autotransporte. Con respecto al 2010, tiene un incremento de aproximadamente el 84.4 % al 2026. En el cuadro 8 se desglosan las aportaciones de CO₂e por tipo de combustible en el sector autotransporte.

Cuadro 8. Emisiones de GEI en el autotransporte (Millones de ton CO₂e)

Año	Combustible			Total
	Gasolina	Diésel	Gas LP	
2010	5.8	3.4	0.1	9.3
2012	6.1	3.4	0.1	9.6
2014	6.9	3.4	0.1	10.4
2016	7.7	3.4	0.1	11.2
2018	8.4	3.4	0.1	11.9
2020	9	3.4	0.1	12.5
2022	9.6	3.4	0.1	13.1
2024	10.2	3.4	0.1	13.7
2026	10.7	3.4	0.1	14.3
2028	10.7	3.4	0.1	14.3
2030	10.7	3.4	0.1	14.3
Total	43.3	16.9	0.6	60.8

Este crecimiento tendencial en las emisiones de CO₂ para el sector autotransporte, tiene una vinculación con el crecimiento de vehículos automotores que se prevé crezcan al 2026. Por otra parte, es importante destacar, que la actividad económica del Estado tendrá una influencia significativa en los consumos energéticos, así como en la aportación de las emisiones de GEI.

Potencial de reducción de emisiones en el sector autotransporte

En los cuadros 9 y 10, se muestra en resumen el escenario base correspondiente a las emisiones totales de GEI en el sector transporte, así como emisiones de GEI por combustible en el sector autotransporte.

Cuadro 9. Emisiones en el sector transporte (millones de TonCO₂e)

Año	Tipo de transporte				Total
	Autotransporte	Marítimo	Ferrovionario	Aéreo	
2010	9.3	0.3	0.2	0.4	10.3
2015	10.8	0.3	0.3	0.3	11.7
2020	12.5	0.3	0.3	0.4	13.4
2025	14	0.3	0.3	0.4	15
2030	14.3	0.3	0.3	0.4	15.3
Total	60.8	1.7	1.3	1.9	65.7

Emisiones de gases con efecto invernadero en el escenario base

Derivado de la estimación de emisiones en 2026, éstas ascenderán a 14.3 millones de Ton CO₂e de los cuales el 74.8 % corresponderán a gasolina, 23.8 % a diésel y el resto a GLP. Se estima que las principales aportaciones de emisiones corresponden a automóviles, camiones y camiones de carga, como se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 10. Emisiones por combustible en autotransporte (millones de TonCO₂e)

Año	Combustible			Total
	Gasolina	Diésel	Gas LP	
2010	5.8	3.4	0.1	9.3
2015	7.3	3.4	0.1	10.8
2020	9	3.4	0.1	12.5
2025	10.5	3.4	0.1	14
2030	10.7	3.4	0.1	14.3
Total	43.3	16.9	0.6	60.8

Cuadro 11. Emisiones por modo de transporte

Modo de Transporte	Aportación de emisiones en el periodo 2010-2030 (Millones de ton CO ₂ e)
Automóviles a gasolina	43.3
Camiones y camionetas para carga a diésel	16.9
Total	60.2

Escenarios de mitigación

Automóviles Particulares del Estado de Veracruz

Los automóviles particulares representan casi el 60 % en el sector autotransporte y el principal combustible para este tipo de vehículos es la gasolina.

E1. Mayor penetración de vehículos a diésel.

Los vehículos a diésel son más eficientes en el uso de energía que los vehículos a gasolina. De acuerdo con IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) [13], los motores a diésel emiten en promedio 19 % menos dióxido de carbono (CO₂) que los a gasolina. Se estima que habría un potencial de reducción del 6.52 %, es decir una reducción de 1'556,179 Ton CO₂e con respecto a las emisiones por automóviles, con relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 2.43 %.

E2. Introducción de vehículos híbridos

Con base en la Prospectiva de Petrolíferos, la evolución deseada del parque vehicular es hacia vehículos subcompactos de altos rendimientos. Dentro de las alternativas para reducir el consumo de combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes, se encuentra la tecnología híbrida³, que combina un motor a gasolina o diésel, con uno eléctrico. Se estima que habría un potencial de reducción del 2.6 %, es decir una reducción de 638,262 TonCO₂e con respecto a las emisiones por automóviles, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 0.98 %.

E3. Utilización de etanol

Históricamente, la producción de bioenergéticos en México ha sido a pequeña escala. Recientemente, se ha comenzado a producir biogás para la generación de electricidad en el norte del país. Asimismo, el biodiesel se ha empleado como combustible, directamente o en mezclas. Se estima que habría un potencial de reducción del 2.04 %, es decir una reducción de 513,368 TonCO₂e con respecto a las emisiones por automóviles, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 0.8%.

E4. Disminución del auto particular en un día sin auto

Este escenario supone un día sin auto, sin embargo esto implicaría mejoras en el transporte público para ofrecer opciones de traslado. Este escenario considera un aumento de un día sin auto de los autos con más antigüedad. Se supone un 5 % anual de la incorporación de los automóviles a un día sin auto con rendimiento promedio constante de 8.16 km/l de acuerdo al IMP [13]. Se estima que habría un potencial de reducción del 5.9 %, es decir una reducción de 1,438,313 TonCO₂e con respecto a las emisiones por automóviles, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 2.24%.

Camiones y camionetas para carga del Estado de Veracruz

Los camiones y camionetas para carga representan el 35 % del transporte carretero. Este tipo de modo de transporte, consume principalmente diésel.

E5. Mayor rendimiento de los camiones y camionetas a diésel.

El rendimiento promedio, de acuerdo a la Prospectiva Petrolífera a través de los años será de 3.5 km/l en 2005 a 4.1 km/l en el 2026. Se estima que habría un potencial de reducción del 21 %, es decir una reducción de 2,942,870 TonCO₂e con respecto a las emisiones por Camiones y Camionetas de carga, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 4.7 %.

E6. Penetración de camiones y camionetas de carga a etanol

Se estima que habría un potencial de reducción del 11.2 %, es decir una reducción de 1'735,655 TonCO₂e con respecto a las emisiones por Camiones y Camionetas de carga, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 2.7 %.

E7. Disminución del uso del camión y camioneta de carga a un día sin circulación

Este escenario considera un aumento de un día sin circulación para aquel transporte con más antigüedad. Se supone una introducción gradual a un "programa un día sin circulación" a partir del 2015 con el 1 % hasta alcanzar en 2026 un 20% con rendimiento promedio constante de 3.3 km/l de acuerdo a SENER (Secretaría de Energía) [14]. Se estima que habría un potencial de reducción del 22.4 %, es decir una reducción de 3'109,618 TonCO₂e con respecto a las emisiones por Camiones y Camionetas de carga, en relación a las aportaciones totales del sector transporte representa una reducción del 4.9 %.

Discusión

Es evidente que las emisiones de GEI derivadas del autotransporte son las principales emisiones en el sector transporte en el Estado de Veracruz, por lo que las estrategias de mitigación debieran estar vinculadas con objetivos y metas concretas a las políticas de transporte y desarrollo urbano. Las emisiones de GEI del sector transporte dependen de la intensidad energética requerida por los diferentes sistemas de transportación, así como por las mezclas de combustibles fósiles que el transporte utiliza. Derivado de esto, es importante la necesidad de reconocer las tendencias en la intensidad energética y el balance de combustibles en el sector.

Es importante destacar que México ya ha considerado acciones de mitigación para el sector transporte en el Programa Especial de Cambio Climático 2008-2012. La literatura sugiere que el transporte ferroviario sea una opción viable como transporte de carga. La Comisión para la Cooperación de América del Norte, publicó que un camión pesado genera 104.5 gramos/tonelada-km de CO₂ contra el ferrocarril, que se estima genera 39.3 gramos/tonelada-km de CO₂. Existe una proporción del uso energético entre los camiones de carga el ferrocarril y que se encuentra entre 1.7 a 1 [15].

Conclusiones

Con base en la proyección de línea base correspondiente al 2010-2026, las emisiones del sector transporte en el Estado en 2010 corresponden a aproximadamente 10.34 millones de ton CO₂e y con base en el escenario tendencial se estima que las emisiones asciendan a 15.3 Millones de ton CO₂e en 2026, es decir aproximadamente 48 % más en comparación al año base. Este aporte podría crecer significativamente hasta un 20.3 % en el periodo proyectado y aunado a la acelerada tasa de motorización del estado, del deterioro de los sistemas de transporte público, y la expansión territorial de las ciudades podría esperarse un incremento adicional.

El subsector con mayor consumo es el autotransporte, que está conformado básicamente por automóviles privados, autobuses pasajeros, camiones de carga y motocicletas y con base en datos históricos de INEGI, se estima que se tenga una tasa de crecimiento anual del 6.2 %.

La gasolina y el diésel son los principales combustibles usados. Es importante destacar que el diésel mantiene una constante en su uso, no obstante la gasolina tiene un crecimiento durante el periodo de tiempo evaluado. Con respecto al año base, la gasolina crece en aproximadamente el 84.4 % al año 2026. El impulso de estos escenarios tiene el potencial de reducir las emisiones de combustibles para el año 2026 en una cantidad equivalente a más del 15% del total de emisiones durante el periodo 2010-2026.

Referencias

- [1] SEMARNAT, "La Gestión Ambiental en México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales", México, 2006, 333 p.
- [2] IPCC. (2007). *Cuarto Reporte. Panel Intergubernamental de Cambio Climático Resumen para tomadores de decisiones* [en línea]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>
- [3] USAID, "Capacidades institucionales y desarrollo de instrumentos de planeación y de política en materia de cambio climático en las 32 entidades federativas y sobre el Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC)", México Low Emissions Development Program (MLED), Tetra Tech ES INC, México, 2014, 177 pp.
- [4] USAID, "Políticas estatales en materia de cambio climático de las 32 entidades federativas de México-Mexico Low Emissions Development Program (MLED)", Tetra Tech ES INC., México, 2012, 56 pp.
- [5] SEMARNAT-INECC, "Bases para una Estrategia de Desarrollo Bajo en Emisiones en México", SEMARNAT-INECC, México, 2012, 120pp.
- [6] INEGI, "Anuario de estadísticas por Entidad Federativa", INEGI, México, 2010, 600 pp.
- [7] SEDEMA, "Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de Veracruz 2010", SEDEMA, Veracruz, México, 2010, 94 pp.
- [8] LEAP, "LEAP, Users Guide for version 2011-first draft", SEI-Stockholm Environment Institute-U.S. Center., EUA. 2007, 301 pp.
- [9] SENER, "Prospectiva de Petrolíferos 2012-2026", SENER, México, 2012, 179 pp.
- [10] INE-IIUNAM, "Guía para realizar balances energéticos estatales para la estimación de inventarios de gases de efecto invernadero. Informe Final", INE-IIUNAM, México, 2012, 47 pp.

- [11] INE (2012). Avances de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático. <http://www2.ine.gob.mx/sistemas/peacc/> (última consulta: Febrero 10, 2013)
- [12] IPCC (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Volumen 1. Orientación general y generación de informes, Cap 3.
- [13] IMP, “Escenarios de emisiones y medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en sectores clave. Sector Transporte”, IMP, México, 2005, 51 pp.
- [14] SENER, “Balance Nacional de Energía 2011”, Dirección General de Planeación Energética, México, 2012, 159 p.
- [15] Comisión para la Cooperación Ambiental, “Un solo destino: las sustentabilidad. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el transporte de carga en América del Norte”, Quebec, Canadá, 2011, 76 p.

Melón (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables

Melon (*Cucumis melo* L.) grown under greenhouse conditions: correlations between variables

Jose Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 16 de enero de 2018
Fecha de aprobación: 6 de mayo de 2018

Monge-Pérez, J. E; Loría-Coto, M. Melón (*Cucumis melo* L.)
cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables.
Tecnología en Marcha. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág
134-150.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4124>

1 Docente en la sede de Guanacaste e Investigador en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx
2 Docente e investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com



Palabras clave

Cucumis melo; número de frutos por metro cuadrado; rendimiento; correlación de Pearson; regresión lineal.

Resumen

Se establecieron correlaciones de Pearson para 63 genotipos de melón producidos bajo invernadero, entre cinco variables cuantitativas: peso del fruto (g), número de frutos por metro cuadrado, rendimiento por área (ton/ha), firmeza de la pulpa del fruto (N), y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix). Los melones andromonoicos produjeron un mayor número de frutos por metro cuadrado y un mayor rendimiento por área, en comparación con los monoicos, y no se encontraron diferencias significativas entre ellos para el peso del fruto, el porcentaje de sólidos solubles totales, ni la firmeza de la pulpa del fruto. La única correlación de Pearson evaluada en los 63 genotipos que fue alta ($r \geq 0,69$) y con significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo entre el rendimiento y el número de frutos por metro cuadrado ($r = 0,79$); en este caso se calculó la regresión lineal ($R^2 = 0,63$). Se concluye que el número de frutos por metro cuadrado es la variable más importante para predecir el rendimiento en melón cultivado en invernadero. Se obtuvieron otras 11 correlaciones altas y con significancia estadística, según el tipo de expresión sexual o según el tipo de melón.

Keywords

Cucumis melo; number of fruits per square meter; yield; Pearson correlation; linear regression.

Abstract

For 63 melon genotypes grown under greenhouse conditions the researchers estimated Pearson correlations between five quantitative variables: fruit weight (g), number of fruits per square meter, yield per area (ton/ha), fruit flesh firmness (N) and percentage of total soluble solids (°Brix). Andromonoecious melons showed a higher number of fruits per square meter and a higher yield than monoecious melons, and there were no significant differences between them for fruit weight, percentage of total soluble solids, and fruit flesh firmness. The only Pearson correlation evaluated in the 63 genotypes that was high ($r \geq 0,69$) and statistically significant ($p \leq 0,05$), was obtained between yield and the number of fruits per square meter ($r = 0,79$); in this case the linear regression was calculated ($R^2 = 0,63$). It is concluded that the number of fruits per square meter is the most important variable to predict yield in greenhouse grown melon. Statistically significant correlations were observed in eleven more cases, not across all genotypes but estimated according the kind of sexual expression or the type of melon.

Introducción

En Costa Rica, la producción hortícola bajo ambiente protegido se inició a finales de los años 80 del siglo XX, principalmente dirigida hacia la exportación de plantas ornamentales y flores. La producción de melón bajo este sistema de cultivo ha sido tradicionalmente muy baja en este país (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar).

En Costa Rica, los tipos de melón que se producen para exportación son: Harper, Cantaloupe, Amarillo, Honey Dew, Galia, Piel de Sapó, Charentais, y Orange Flesh. Durante el año 2009, el 85 % de las exportaciones a Estados Unidos correspondieron a melón tipo Harper y Cantaloupe, y

el 15 % restante a Honey Dew, mientras que las exportaciones a Europa estuvieron encabezadas por el melón tipo Amarillo (58 %), seguido de Harper y Cantaloupe (39 %), y Galia (3 %) [1].

En el cultivo de melón bajo invernadero se utiliza generalmente un tutorado, lo que permite un mejor aprovechamiento del área. El cultivo protegido presenta varias ventajas sobre el cultivo a campo abierto, como la obtención de mayor número de cosechas durante el año, precocidad de la cosecha, economía de agua y fertilizantes, mayor rendimiento, y mejor calidad de los frutos [2]. En el cultivo bajo ambiente protegido se alteran las características ambientales de clima y de suelo: hay menor radiación solar global, evapotranspiración y viento, y hay mayor radiación difusa, temperatura y humedad relativa del aire [3].

Por otra parte, el cultivo de melón en sistema hidropónico permite un control parcial de las condiciones climáticas, menor aplicación de plaguicidas, manejo adecuado del agua y de los nutrientes de acuerdo al desarrollo del cultivo, la posibilidad de cultivar a mayor densidad, y un aumento significativo en la productividad y calidad del producto final [2].

Una ventaja de la producción de melón en invernadero es que se puede cultivar durante todo el año. En Costa Rica hay una importante demanda insatisfecha durante la época lluviosa, debido a la muy baja o nula producción (y de baja calidad) de melón a campo abierto, por lo que los consumidores podrían estar dispuestos a pagar precios altos por frutos de alta calidad en esa época; la producción de melón bajo ambiente protegido abriría esta oportunidad comercial para los agricultores [4].

Un aspecto clave en cualquier proyecto de producción hortícola es la selección del genotipo adecuado. Cada genotipo presenta características particulares en cuanto al crecimiento de la planta y del fruto. Un cultivar adecuado deberá tener diversas características sobresalientes, entre las que se incluyen: buen rendimiento, resistencia a enfermedades, buena calidad del fruto, adaptabilidad a las condiciones ambientales donde se pretende cultivar, un mercado aceptable, y una larga vida de anaquel. La calidad de los frutos de melón está relacionada con características como la concentración de sólidos solubles totales, la apariencia interna y externa del fruto, el grosor de la pulpa y el sabor, las que determinan la aceptabilidad del consumidor. La escogencia de un híbrido de melón sin una evaluación previa puede acarrear perjuicios en la productividad y la calidad obtenidas [2].

La existencia de correlaciones significativas entre diversas variables en un cultivo puede ayudar a realizar una selección más rápida de los mejores genotipos a nivel de producción agrícola, y esto es también un factor de relevancia en los procesos de fitomejoramiento, pues ayuda a identificar las variables más importantes a ser consideradas para la generación de nuevos genotipos.

El objetivo de esta investigación fue establecer las correlaciones de Pearson existentes entre cinco variables cuantitativas evaluadas para 63 genotipos de melón, cultivados bajo ambiente protegido, en Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

Se cultivaron 63 genotipos de melón (*Cucumis melo* L.), correspondientes a diez tipos diferentes: Amarillo, Cantaloupe, Cantaloupe Italiano, Charentais, Crenshaw, Galia, Harper, Honey Dew, Honey Dew Orange Flesh, y Japonés (cuadro 1).

La siembra se realizó en condiciones hidropónicas, en el invernadero de Hortalizas de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), la cual está localizada en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883 msnm. Los tipos de melón se caracterizaron según la descripción de la literatura [5].

Cuadro 1. Genotipos utilizados en la investigación.

Tipo	Genotipos
Amarillo (n=5)	Lady (Agriset), Brilliant (Agriset), 16-26-69 (Pandía), Sunshine (Agriset), XY-05-8 (Xinjiang Mag-Era)
Cantaloupe (n=10)	UG-505 (United Genetics), UG-4305 (United Genetics), 325 (Xinjiang Mag-Era), Charon (DP Seeds), Electra (DP Seeds), Sidewinder Improved (DP Seeds), OTM-10-112 (Catom), MKS-M220 (Agriset), Holbrook (Hollar), Torreón (United Genetics)
Cantaloupe Italiano (n=1)	Vida (DP Seeds)
Charentais (n=5)	Gandalf (Nunhems), E-81-8200 (Enza Zaden), Oui (DP Seeds), OT-8-140 (Catom), Skol (DP Seeds)
Crenshaw (n=1)	Lilly (DP Seeds)
Galia (n=13)	Solarnet (Nunhems), E-81-2097 (Enza Zaden), 10-26-60 (Pandía), Gala (DP Seeds), Kelsey (DP Seeds), Sigal (DP Seeds), Winner (DP Seeds), HSR-4370 (Hollar), OTM-9-21 (Catom), AX-12-4075 (Agriset), AX-12-4078 (Agriset), HSR-4310 (Hollar), HSR-4402 (Hollar)
Harper (n=18)	M-10 (Xinjiang Mag-Era), Cupid (Agriset), Dainty (Agriset), Red Aroma (Agriset), Red Lover (Agriset), Crete No. 1 (Agriset), Infinito (DP Seeds), Sante (DP Seeds), Caribbean Dream (Rijk Zwaan), WSC-08-46 (DP Seeds), HSR-4366 (Hollar), MKS-M218 (Agriset), HSR-4406 (Hollar), HSR-4408 (Hollar), HSR-4411 (Hollar), HSR-4413 (Hollar), OTM-10-108 (Catom), OTM-10-271 (Catom)
Honey Dew (n=5)	T-10 (Xinjiang Mag-Era), Capo Verde (United Genetics), UG-1108 (United Genetics), Dewlightful (Hollar), Dewluxe (Hollar)
Honey Dew Orange Flesh (n=2)	Uncle Sam (United Genetics), XH-336 (Xinjiang Mag-Era)
Japonés (n=3)	Arkanga (Green Seeds), Alien (Green Seeds), Cream Dew NP-6 (Green Seeds)

Nota: el nombre entre paréntesis corresponde a la casa comercial proveedora de la semilla.

El ensayo se transplantó el 3 de noviembre de 2011; las plantas iniciaron cosecha el 9 de enero de 2012, es decir a los 67 días después de transplante (ddt), y la evaluación de los frutos se llevó a cabo hasta el 6 de marzo de 2012 (124 ddt).

El cultivo se realizó en sacos de fibra de coco, de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de altura. La distancia de siembra fue de 25 cm entre plantas, y de 1,54 m entre hileras, para una densidad de 2,60 plantas/m². Las plantas se sujetaron por medio de dos mallas plásticas, ubicadas una a cada lado de cada hilera de plantas. Todas las plantas se decapitaron cuando tenían cuatro hojas verdaderas (12 ddt) y se dejó crecer los tallos secundarios libremente.

Se implementó un sistema de manejo integrado de plagas, y se utilizó un programa de fertilización validado para la producción comercial de melón, según las experiencias previas en el invernadero de la EEAFBM. El fertirriego se suministró a cada hora, entre las 7:00 a.m. y las 4:00 p.m. Se contó con polinización entomófila en el invernadero, por medio de una colmena de *Apis mellifera* y otra de *Nannotrigona* sp.

A partir de los descriptores propuestos a nivel internacional para el cultivo de melón [6], se seleccionaron las siguientes variables a evaluar:



Variables cualitativas

Tipo de expresión sexual: se determinó evaluando la presencia de flores hermafroditas (andromonoica) o femeninas (monoica), además de las masculinas, en cada genotipo.

Variables cuantitativas

Número de frutos por metro cuadrado: se obtuvo al registrar el número total de frutos producidos en cada parcela, y dividir ese dato entre el número de plantas por parcela, y luego se multiplicó por la densidad de siembra.

Rendimiento por área (ton/ha): se estimó el peso de los frutos de melón producidos en una hectárea, a partir del rendimiento por planta y de la densidad de siembra.

Peso del fruto (g): se midió el peso individual de todos los frutos por cada genotipo, y se obtuvo el promedio.

Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix): se obtuvo el porcentaje de sólidos solubles totales de varios frutos por cada genotipo, y se obtuvo el promedio.

Firmeza de la pulpa del fruto (N): se midió la firmeza de la pulpa de varios frutos por cada genotipo, y se obtuvo el promedio.

El peso de los frutos se obtuvo con una balanza electrónica marca Ocony, modelo TH-I-EK, de $5000,0 \pm 0,1$ g de capacidad. El porcentaje de sólidos solubles totales se determinó con un refractómetro manual marca Atago, modelo N-1a, con una escala de $0,0-32,0 \pm 0,2$ %. Para la evaluación de firmeza del fruto se utilizó un penetrómetro portátil marca Effegi, modelo FT-327, con una capacidad de $12,5 \pm 0,1$ kilogramo-fuerza, y los datos se multiplicaron por un factor de conversión de 9,806 para obtener el dato en Newtons (N); se utilizó el puntero cuya base mide 7,5 mm de ancho.

Para cada genotipo se sembró una parcela con 8 plantas (2 sacos), y todos los datos se obtuvieron a partir de los frutos totales producidos en dicha parcela.

Para obtener la comparación entre los dos tipos de expresión sexual evaluados (andromonoica y monoica), se utilizó la prueba de t de Student con una significancia de 5 % para determinar diferencias entre tratamientos, donde los tratamientos fueron cada tipo de expresión sexual, y cada genotipo correspondió a una repetición.

Además, para las cinco variables evaluadas, se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ellas, y para aquellas combinaciones de variables en que se obtuvo una alta correlación ($r \geq 0,69$) y significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo la regresión lineal con su respectiva ecuación y su coeficiente de determinación (R^2). Las correlaciones se obtuvieron tanto entre el total de los 63 genotipos evaluados, como según el tipo de expresión sexual, y también según el tipo de melón (excepto para los tipos Honey Dew Orange Flesh, Crenshaw y Cantaloupe Italiano, en cuyo caso el número de repeticiones fue muy bajo).

Resultados y discusión

Con respecto al tipo de expresión sexual, 47 genotipos fueron andromonoicos, y 13 fueron monoicos (cuadro 2) (no se logró obtener este dato en el caso de tres genotipos). No se presentaron diferencias estadísticamente significativas para el peso del fruto, la firmeza de la pulpa del fruto, ni el porcentaje de sólidos solubles totales, entre los genotipos monoicos y los andromonoicos. Sin embargo, sí se presentaron diferencias altamente significativas entre ellos para el número de frutos por metro cuadrado, y para el rendimiento; los genotipos andromonoicos produjeron un mayor número de frutos por metro cuadrado y un mayor rendimiento, en comparación con los monoicos.

Cuadro 2. Influencia del tipo de expresión sexual sobre las variables evaluadas.

Variable	Tipo de expresión sexual	
	Monoica (n=13)	Andromonoica (n=47)
Firmeza del fruto (N)	22,13 a	17,26 a
Número de frutos/m ²	2,12 a	5,80 b
Peso del fruto (g)	606,66 a	603,57 a
Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)	13,58 a	14,13 a
Rendimiento (ton/ha)	12,32 a	34,60 b

Nota: valores con una letra en común entre tratamientos no son significativamente diferentes, según la prueba de t de Student ($p \leq 0,05$).

A pesar de la importancia de la influencia de la expresión sexual sobre el rendimiento del melón producido bajo invernadero, la información sobre esta característica no siempre es fácil de obtener al momento de la compra de la semilla, por lo que es necesario hacer la consulta técnica especializada ante la empresa productora de la semilla, o sembrar algunas plantas previamente para observar sus flores.

Con respecto a la correlación entre el porcentaje de sólidos solubles totales y el peso del fruto, en ningún caso se obtuvo significancia estadística, excepto para los melones tipo Harper, pero dicha correlación fue muy baja ($r = 0,45$) (cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) y peso del fruto (g).

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	0,10	ns	
Andromonoicos (n=47)	0,18	ns	
Monoicos (n=13)	0,10	ns	
Amarillo (n=5)	0,16	ns	
Cantaloupe (n=10)	-0,31	ns	
Charentais (n=5)	0,11	ns	
Galia (n=13)	0,23	ns	
Harper (n=18)	0,45	*	
Honey Dew (n=5)	0,79	ns	
Japonés (n=3)	-0,90	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

En melón cultivado a campo abierto, unos investigadores encontraron una alta correlación entre el porcentaje de sólidos solubles totales y el peso promedio del fruto (valor de r entre 0,84 y 0,93, según la densidad de siembra), aunque ellos argumentaron que esos datos podrían haber sido distorsionados por un genotipo que obtuvo un valor muy bajo en el porcentaje de sólidos solubles totales, por lo que más bien consideraron que dicha variable se mantuvo constante, sin importar el peso del fruto, cuando los frutos se cosecharon en plena madurez [7].

En el caso de la correlación entre la firmeza del fruto y el peso del fruto, solamente se presentó significancia estadística para los melones tipo Amarillo, con un coeficiente de correlación muy alto ($r = -0,97$) (cuadro 4). En la figura 1 se muestra la ecuación de regresión lineal para este caso, la cual presentó un coeficiente de determinación bastante alto ($R^2 = 0,94$); la relación fue inversamente proporcional, es decir, que los frutos con mayor peso fueron los que presentaron la menor firmeza de la pulpa.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre firmeza del fruto (N) y peso del fruto (g).

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=63)	-0,24	ns	
Andromonoicos (n=47)	-0,33	ns	
Monoicos (n=13)	-0,09	ns	
Amarillo (n=5)	-0,97	*	0,94
Cantaloupe (n=10)	-0,26	ns	
Charentais (n=5)	0,69	ns	
Galia (n=13)	-0,29	ns	
Harper (n=18)	-0,17	ns	
Honey Dew (n=5)	-0,52	ns	
Japonés (n=3)	0,15	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre rendimiento y peso del fruto fue significativa entre los 63 genotipos evaluados, pero dicho coeficiente fue bajo ($r = 0,36$) (cuadro 5). Algo similar ocurrió con los genotipos andromonoicos ($r = 0,49$) y con los melones tipo Harper ($r = 0,43$), ya que en ningún caso dicho coeficiente fue superior a 0,69. En los demás casos no hubo significancia estadística.

La correlación entre el número de frutos por metro cuadrado y el peso del fruto únicamente fue significativa en el caso de los melones tipo Amarillo ($r = -0,87$) (cuadro 6), la cual evidenció una relación inversamente proporcional, es decir, que a mayor número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo un menor peso del fruto. En la figura 2 se muestra la ecuación de regresión lineal para este caso, con un coeficiente de determinación de 0,76.

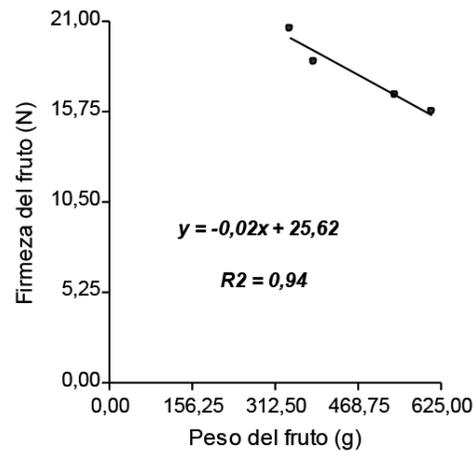


Figura 1. Regresión lineal de la firmeza del fruto versus el peso del fruto para los melones tipo Amarillo evaluados.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre rendimiento (ton/ha) y peso del fruto (g).

Genotipos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	0,36	**	0,13
Andromonoicos (n=47)	0,49	**	
Monoicos (n=13)	0,25	ns	
Amarillo (n=5)	-0,25	ns	
Cantaloupe (n=10)	0,35	ns	
Charentais (n=5)	0,71	ns	
Galia (n=13)	0,34	ns	
Harper (n=18)	0,43	*	
Honey Dew (n=5)	0,35	ns	
Japonés (n=3)	0,83	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre número de frutos por metro cuadrado y peso del fruto (g).

Genotipos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	-0,18	ns	
Andromonoicos (n=47)	-0,21	ns	
Monoicos (n=13)	-0,20	ns	
Amarillo (n=5)	-0,87	**	0,76
Cantaloupe (n=10)	-0,15	ns	
Charentais (n=5)	0,53	ns	
Galia (n=13)	-0,13	ns	
Harper (n=18)	0,01	ns	
Honey Dew (n=5)	-0,36	ns	
Japonés (n=3)	-0,01	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

Al igual que en el presente ensayo, unos investigadores encontraron también una correlación negativa ($r = -0,98$) entre el número de frutos por planta y el peso promedio del fruto, para un genotipo de melón cultivado a campo abierto, con un coeficiente de determinación de 0,92 para la ecuación de regresión lineal [7].

En otras investigaciones, se ha informado que en el caso de melones tipo Japonés y tipo Cantaloupe cultivados en invernadero, a mayor número de frutos por metro cuadrado se obtuvo un menor peso de los frutos [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Estos resultados coinciden con los hallados en el presente estudio.

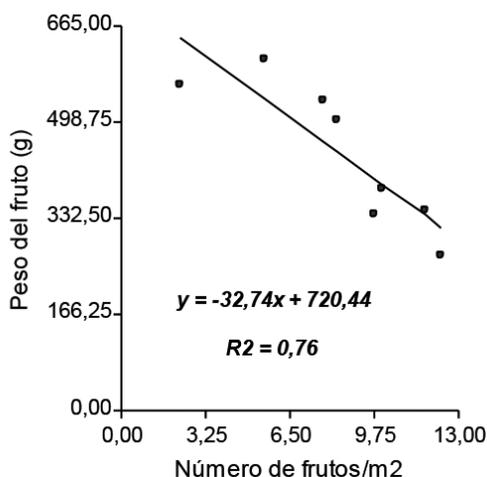


Figura 2. Regresión lineal del peso del fruto versus el número de frutos/m² para los melones tipo Amarillo evaluados.

La correlación entre el porcentaje de sólidos solubles totales y la firmeza del fruto únicamente presentó significancia estadística para el caso de los melones tipo Harper ($r = -0,84$) (cuadro 7), con una relación inversamente proporcional, es decir, que a mayor firmeza del fruto, se obtuvo un menor porcentaje de sólidos solubles totales. En la figura 3 se muestra la ecuación de regresión lineal para este caso, con un coeficiente de determinación de 0,70.

Para la correlación entre el porcentaje de sólidos solubles totales y el rendimiento, solamente se presentó significancia estadística para el total de genotipos evaluados, así como para los genotipos andromonocicos, y los melones Harper y Cantaloupe (cuadro 8). Sin embargo, entre estos casos, el coeficiente de correlación únicamente fue alto para el caso de los melones tipo Cantaloupe ($r = -0,77$), el cual evidenció una relación inversamente proporcional, es decir, que a mayor rendimiento se obtuvo un menor porcentaje de sólidos solubles totales; en la figura 4 se presenta la ecuación de regresión lineal para este caso, con un coeficiente de determinación de 0,60.

Con respecto a la correlación entre el porcentaje de sólidos solubles totales y el número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo significancia estadística para el total de genotipos evaluados, así como para los genotipos andromonocicos y los melones Cantaloupe (cuadro 9). Sin embargo, el coeficiente de correlación únicamente fue alto para el caso de los melones tipo Cantaloupe ($r = -0,69$), el cual mostró una relación inversamente proporcional, por lo que a mayor número de frutos por metro cuadrado se obtuvo un menor porcentaje de sólidos solubles totales; en la figura 5 se presenta la ecuación de regresión lineal para este caso, con un coeficiente de determinación de 0,48.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) y firmeza del fruto (N).

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	-0,02	ns	
Andromonoicos (n=47)	-0,01	ns	
Monoicos (n=13)	-0,22	ns	
Amarillo (n=5)	-0,04	ns	
Cantaloupe (n=10)	0,32	ns	
Charentais (n=5)	-0,16	ns	
Galia (n=13)	0,14	ns	
Harper (n=18)	-0,84	**	0,70
Honey Dew (n=5)	-0,53	ns	
Japonés (n=3)	-0,57	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

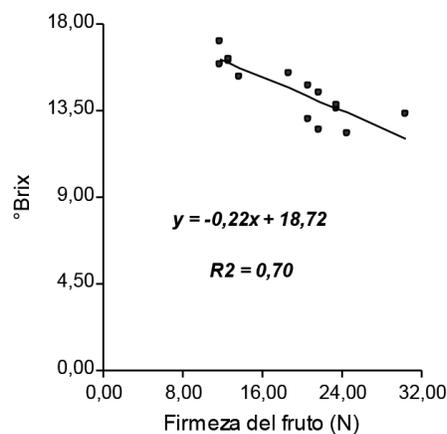


Figura 3. Regresión lineal del porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) versus la firmeza del fruto (N) para los melones tipo Harper evaluados.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) y rendimiento (ton/ha).

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	0,37	**	0,14
Andromonoicos (n=47)	0,45	**	
Monoicos (n=13)	-0,23	ns	
Amarillo (n=5)	0,13	ns	
Cantaloupe (n=10)	-0,77	**	0,60
Charentais (n=5)	-0,16	ns	
Galia (n=13)	-0,01	ns	
Harper (n=18)	0,55	**	
Honey Dew (n=5)	0,38	ns	
Japonés (n=3)	-0,99	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

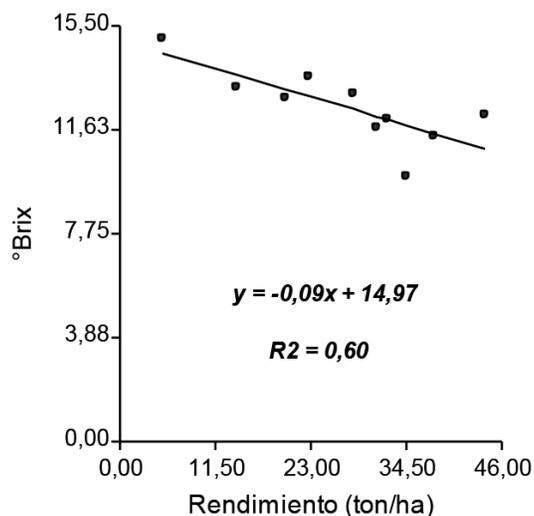


Figura 4. Regresión lineal del porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) versus el rendimiento para los melones tipo Cantaloupe evaluados.

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) y número de frutos por metro cuadrado.

Genotipos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	0,33	**	0,11
Andromonocicos (n=47)	0,39	**	
Monoicos (n=13)	-0,31	ns	
Amarillo (n=5)	-0,07	ns	
Cantaloupe (n=10)	-0,69	*	0,48
Charentais (n=5)	-0,19	ns	
Galia (n=13)	0,01	ns	
Harper (n=18)	0,35	ns	
Honey Dew (n=5)	-0,14	ns	
Japonés (n=3)	-0,42	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

Otros investigadores también han encontrado que en melón tipo Japonés y Cantaloupe cultivados en invernadero, conforme aumenta el número de frutos por metro cuadrado, disminuye el porcentaje de sólidos solubles totales [8], [13], [15]. Esos resultados coinciden con los hallados en el presente estudio.

No se obtuvo significancia estadística en ningún caso, tanto para la correlación entre la firmeza del fruto y el rendimiento (cuadro 10), como para la correlación entre la firmeza del fruto y el número de frutos por metro cuadrado (cuadro 11).

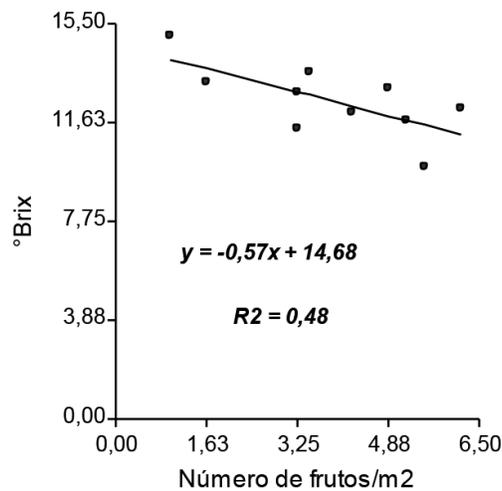


Figura 5. Regresión lineal del porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) versus el número de frutos/m² para los melones tipo Cantaloupe evaluados.

Cuadro 10. Coeficientes de correlación de Pearson entre firmeza del fruto (N) y rendimiento (ton/ha).

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	-0,25	ns	
Andromonoicos (n=47)	-0,28	ns	
Monoicos (n=13)	0,39	ns	
Amarillo (n=5)	-0,28	ns	
Cantaloupe (n=10)	-0,37	ns	
Charentais (n=5)	0,17	ns	
Galia (n=13)	-0,42	ns	
Harper (n=18)	-0,45	ns	
Honey Dew (n=5)	-0,46	ns	
Japonés (n=3)	0,68	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

En el caso de la correlación entre el rendimiento y el número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo significancia estadística ($p \leq 0,05$) y alta correlación ($r \geq 0,69$) en todos los casos evaluados, excepto para los melones tipo Amarillo, Honey Dew, y Japonés (cuadro 12). En las siguientes figuras se muestran las ecuaciones de regresión lineal para todos los 63 genotipos evaluados (figura 6; $R^2 = 0,63$), para los genotipos andromonoicos (figura 7; $R^2 = 0,47$) y los monoicos (figura 8; $R^2 = 0,79$), así como para los melones tipo Cantaloupe (figura 9; $R^2 = 0,74$), Charentais (figura 10; $R^2 = 0,94$), Galia (figura 11; $R^2 = 0,71$), y Harper (figura 12; $R^2 = 0,80$). En todos estos casos, la relación fue directamente proporcional, es decir, que a mayor número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo un mayor rendimiento.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre firmeza del fruto (N) y número de frutos por metro cuadrado.

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	-0,17	ns	
Andromonoicos (n=47)	-0,19	ns	
Monoicos (n=13)	0,47	ns	
Amarillo (n=5)	0,87	ns	
Cantaloupe (n=10)	-0,33	ns	
Charentais (n=5)	0,06	ns	
Galia (n=13)	-0,34	ns	
Harper (n=18)	-0,41	ns	
Honey Dew (n=5)	-0,22	ns	
Japonés (n=3)	0,99	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Cuadro 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre rendimiento (ton/ha) y número de frutos por metro cuadrado.

Genotipos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=63)	0,79	**	0,63
Andromonoicos (n=47)	0,69	**	0,47
Monoicos (n=13)	0,89	**	0,79
Amarillo (n=5)	0,67	ns	
Cantaloupe (n=10)	0,86	**	0,74
Charentais (n=5)	0,97	**	0,94
Galia (n=13)	0,84	**	0,71
Harper (n=18)	0,89	**	0,80
Honey Dew (n=5)	0,74	ns	
Japonés (n=3)	0,55	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

En un ensayo de producción de tres genotipos de melón a campo abierto, a dos densidades de siembra (13605,51 y 6802,86 plantas/ha) y en dos sitios distintos, se encontró una correlación positiva entre las variables número de frutos por metro cuadrado y rendimiento por hectárea, con valores de r que oscilaron entre 0,49 y 0,99 [7]. Esos investigadores también encontraron ecuaciones de regresión lineal que relacionaron en forma directamente proporcional el número de frutos por planta y el rendimiento por planta, con coeficientes de determinación de 0,96 y 0,93. Esos resultados coinciden con los obtenidos en el presente ensayo.

Por otra parte, en evaluaciones de producción de melón tipo Japonés en invernadero, otros autores hallaron que, conforme aumenta el número de frutos por metro cuadrado, también aumenta el rendimiento [9], [11], [14], lo cual es similar a lo obtenido en la presente investigación.

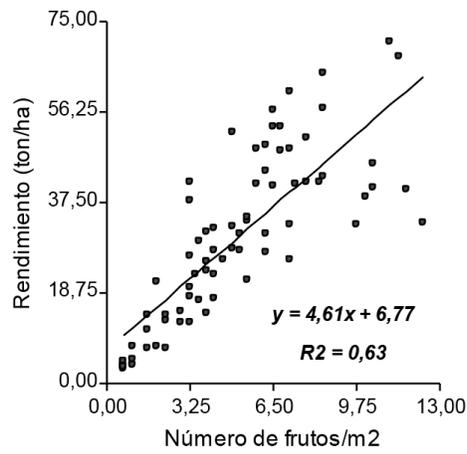


Figura 6. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para el total de genotipos evaluados (n=63).

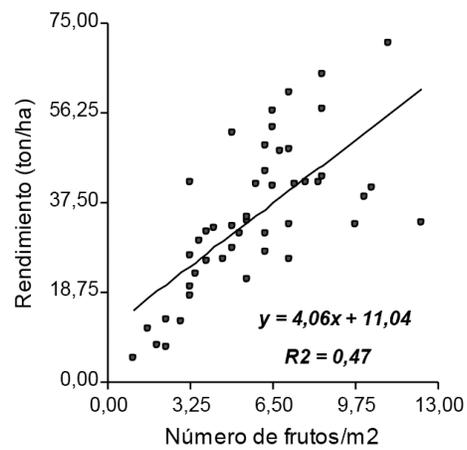


Figura 7. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los genotipos andromonoicos evaluados (n=47).

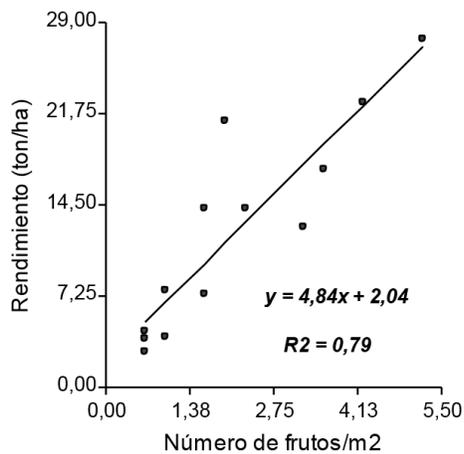


Figura 8. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los genotipos monoicos evaluados (n=13).

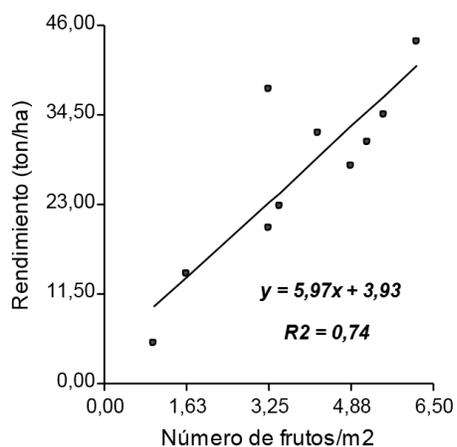


Figura 9. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los melones tipo Cantaloupe evaluados.

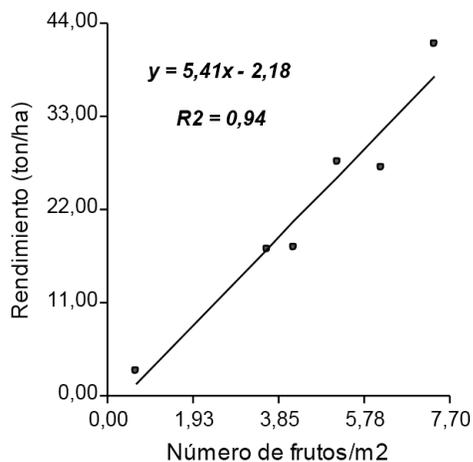


Figura 10. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los melones tipo Charentais evaluados.

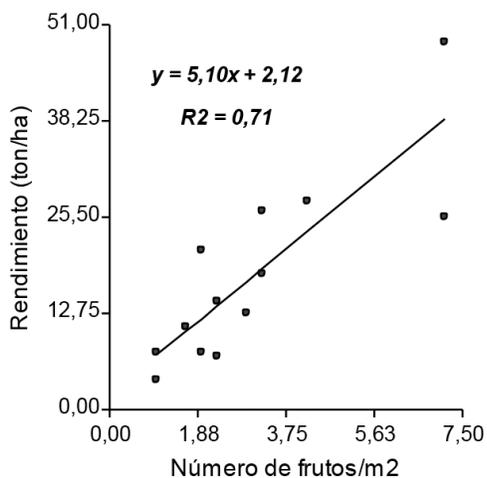


Figura 11. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los melones tipo Galia evaluados.

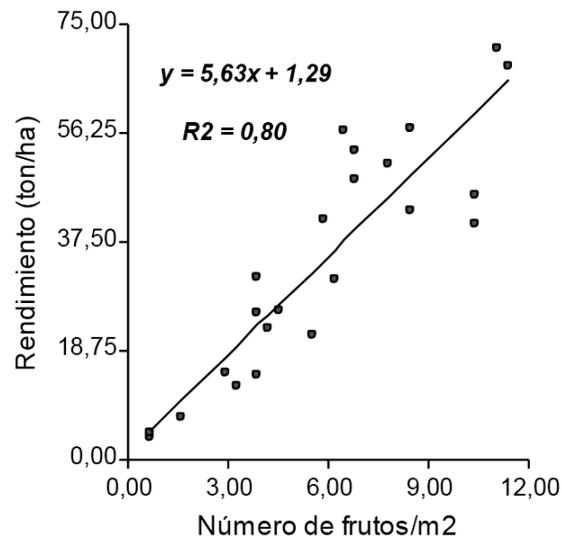


Figura 12. Regresión lineal del rendimiento versus el número de frutos/m² para los melones tipo Harper evaluados.

Por lo tanto, entre las diez correlaciones de Pearson evaluadas para los 63 genotipos, la única que fue alta ($r \geq 0,69$) y con significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo entre el rendimiento y el número de frutos por metro cuadrado ($r = 0,79$), con una relación directamente proporcional, es decir, que a mayor número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo un mayor rendimiento. Por lo tanto, se concluye que el número de frutos por metro cuadrado es la variable más importante para predecir el rendimiento en melón cultivado en invernadero, y no así la variable peso del fruto, cuya correlación con el rendimiento fue de solamente 0,36.

Entre todos los genotipos evaluados, las siguientes tres correlaciones sí fueron estadísticamente significativas, pero el grado de correlación fue bajo: rendimiento y peso del fruto ($r = 0,36$); rendimiento y porcentaje de sólidos solubles totales ($r = 0,37$); y número de frutos por metro cuadrado y porcentaje de sólidos solubles totales ($r = 0,33$).

Por otra parte, entre todos los genotipos evaluados, las correlaciones fueron no significativas estadísticamente en los siguientes seis casos: peso del fruto y porcentaje de sólidos solubles totales; peso del fruto y firmeza del fruto; peso del fruto y número de frutos por metro cuadrado; firmeza del fruto y porcentaje de sólidos solubles totales; firmeza del fruto y rendimiento; y firmeza del fruto y número de frutos por metro cuadrado.

Conclusiones y recomendaciones

Los melones andromonoicos produjeron un mayor número de frutos por metro cuadrado y un mayor rendimiento por área, en comparación con los monoicos. No se encontraron diferencias significativas entre ellos para el peso del fruto, el porcentaje de sólidos solubles totales, ni la firmeza de la pulpa del fruto.

La única correlación de Pearson evaluada en los 63 genotipos que fue alta ($r \geq 0,69$) y con significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo entre el rendimiento y el número de frutos por metro cuadrado ($r = 0,79$), con una relación directamente proporcional, es decir, que a mayor número de frutos por metro cuadrado, se obtuvo un mayor rendimiento; en este caso se calculó la regresión lineal, que mostró un coeficiente de determinación de 0,63. Se concluye que el número de frutos por metro cuadrado es la variable más importante para predecir el rendimiento en melón cultivado en invernadero.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Cristina Arguedas, María José Moya, Carolina Ramírez, Marcela Mora, Jorge Díaz, Felipe Coto, José González, Julio Vega, Carlos González y Andrés Oviedo en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés. Asimismo, agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez, "Producción y exportación de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n° 1, pp. 93-103, 2014.
- [2] P. F. Vargas, R. Castoldi, H. C. O. Charlo y L. T. Braz, «Qualidade de melão rendilhado (*Cucumis melo* L.) em função do sistema de cultivo,» *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 32, n° 1, pp. 137-142, 2008.
- [3] S. R. Martins, R. M. Peil, J. E. Schwengber, F. N. Assis y M. E. G. Mendez, «Produção de melão em função de diferentes sistemas de condução de plantas em ambiente protegido,» *Horticultura Brasileira*, vol. 16, n° 1, pp. 24-30, 1998.
- [4] J. E. Monge-Pérez, "Evaluación preliminar de 201 genotipos de ocho diferentes hortalizas (berenjena, chile dulce, zucchini, ayote, sandía, pepino, tomate y melón) cultivados bajo invernadero en Costa Rica," de *La investigación en Guanacaste II*, San José, Costa Rica, Editorial Nuevas Perspectivas, 2016, pp. 277-300.
- [5] J. M. Torres, «Los tipos de melón comerciales,» de *Melones*, España, Ediciones de Horticultura, 1997, pp. 13-20.
- [6] International Plant Genetic Resources Institute, *Descriptors for melon (*Cucumis melo* L.)*, Rome, Italy: IPGRI, 2003.
- [7] F. Kultur, H. C. Harrison y J. E. Staub, «Spacing and genotype affect fruit sugar concentration, yield, and fruit size of muskmelon,» *Hort Science*, vol. 36, n° 2, pp. 274-278, 2001.
- [8] R. Castoldi, H. C. O. Charlo, P. F. Vargas y L. T. Braz, «Qualidade de frutos de cinco híbridos de melão rendilhado em função do número de frutos por planta,» *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 30, n° 2, pp. 455-458, 2008.
- [9] H. C. O. Charlo, R. Castoldi, P. F. Vargas y L. T. Braz, «Cultivo de melão rendilhado com dois e três frutos por planta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 27, n° 2, pp. 251-255, 2009.
- [10] R. Gualberto, F. V. Resende y P. H. L. Losasso, «Produtividade e qualidade do melão rendilhado em ambiente protegido, em função do espaçamento e sistema de condução,» *Horticultura Brasileira*, vol. 19, n° 3, pp. 240-243, 2001.
- [11] L. F. V. Purquerio, A. B. C. Filho y J. C. Barbosa, «Efeito da concentração de nitrogênio na solução nutritiva e do número de frutos por planta sobre a produção do meloeiro,» *Horticultura Brasileira*, vol. 21, n° 2, pp. 185-190, 2003.
- [12] R. C. F. Queiroga, M. Puiatti, P. C. R. Fontes y P. R. Cecon, «Partição de assimilados e índices fisiológicos de cultivares de melão do grupo *Cantalupensis* influenciados por número e posição de frutos na planta, em ambiente protegido,» *Revista Ceres*, vol. 55, n° 6, pp. 596-604, 2008.
- [13] R. C. F. Queiroga, M. Puiatti, P. C. R. Fontes y P. R. Cecon, «Produtividade e qualidade do melão cantaloupe, cultivado em ambiente protegido, variando o número e a posição dos frutos na planta,» *Bragantia*, vol. 67, n° 4, pp. 911-920, 2008.
- [14] C. C. Costa, A. B. C. Filho, R. L. Cavarianni y J. C. Barbosa, «Produção do melão rendilhado em função da concentração de potássio na solução nutritiva e do número de frutos por planta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 22, n° 1, pp. 23-27, 2003.
- [15] R. C. F. Queiroga, M. Puiatti, P. C. R. Fontes y P. R. Cecon, «Produtividade e qualidade de frutos de meloeiro variando número de frutos e de folhas por planta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 26, n° 2, pp. 209-215, 2008.

Predicción de la vida útil en reparaciones de automóviles

Prediction of lifespan in car repairs

Alicia Salazar-Hernández¹, César Garita-Rodríguez²

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2018

Fecha de aprobación: 29 de mayo de 2018

Salazar-Hernández, A; Garita-Rodríguez, C. Predicción de la vida útil en reparaciones de automóviles. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 151-166.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4125>



- 1 Master en Computación. Escuela de Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: asalazar@tec.ac.cr
- 2 Dr. en Ciencias de la Computación. Escuela de Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: cesar@tec.ac.cr

Palabras clave

Predicción de mantenimiento; predicción vida útil; uso de repuestos; aplicación de predicción; CBR; RBC.

Resumen

El mantenimiento preventivo en un automóvil reduce significativamente el tiempo en que éste se encuentra fuera de funcionamiento; sin embargo, saber con mayor exactitud cuándo se debe realizar este tipo de trabajos y/o reparaciones no es una ciencia cierta. Los talleres mecánicos usualmente proveen de mantenimientos reactivos y hasta el momento no cuentan con una herramienta que le indiquen al usuario cuándo se debe hacer la siguiente visita.

Con la utilización del razonamiento basado en casos, se construyó un sistema informático que toma y procesa información tanto de los estándares del fabricante como también valores ambientales propios del tipo de uso del automóvil, obteniendo así una mayor precisión sobre el comportamiento en carretera y por tanto se puede saber con mayor certeza cuándo se debe reparar nuevamente el automóvil.

Una vez concluido el proyecto, se pudo observar cómo al adaptar la técnica sugerida con una base de datos en crecimiento, tanto de información relevante al automóvil como también de sus similares, los talleres mecánicos que utilicen esta herramienta, son capaces entonces de brindar un mejor servicio a sus clientes, y éstos últimos se ven beneficiados ya que pueden planear mejor el momento de revisiones y mantenimiento, mejorando de esta forma la condición general del automóvil.

Keywords

Maintenance prediction; lifespan prediction; repair parts use; prediction system; CBR; RBC.

Abstract

Preventive maintenance for an automobile, significantly reduces the time of a vehicle to be out of service; nonetheless, knowing when any kind of maintenance or repairs should be done to the automobile it is not an exact science. Mechanical and repair shops usually provide service as a reactive measure, and up to this date, there are not automated tools to let know the user when should the next visit or repair must be done.

Utilizing case based reasoning, an informatics automated system was build, so that it takes and processes data including manufacturer's standards and the vehicle's environment, converting it into information, generating a more precise data about the automobile so that it can predict when should the next repair occur.

Once the project concluded, it allowed to observe how the technic chosen with a growing database with relevant information about the automobile and it's similar, all the repair shops who will use this tool, will be capable to give a better service for their customers, and also automobile owners will get benefits, since they can now plan ahead checkups and repairs which in the end will transform in a better vehicle overall health and time saving for its owners.

Introducción

Con la variedad de automotores, situaciones ambientales y su uso, cada vez es más la información y componentes tanto mecánicos como electrónicos que poseen los automóviles, que pueden provocar cientos de fallas inesperadas a sus dueños.

Debido a la gran cantidad de variables existentes, no se cuenta hasta el momento con herramientas que ayuden al conductor y su proveedor de servicio obtener información certera sobre los periodos en que se debe realizar mantenimientos. Analizando la situación, se planteó el uso de una técnica que ayude a las conclusiones sobre estas situaciones, utilizando conocimiento específico de casos y problemas en situaciones similares [1].

Desde siempre, los humanos tomamos decisiones basados en problemas y resultados anteriores, por lo que almacenar esta información y hacer que un sistema computacional deduzca por medio de la historia, puede por tanto ayudar con predicciones en diferentes ámbitos, y ser adaptados en particular al proyecto en cuestión.

Para la determinación de la vida útil de la reparación, se utilizará una metodología de razonamiento basado en casos “Case-Based Reasoning”, el cual se basa en solucionar un problema basado en problemas similares que han sucedido anteriormente. El CBR, nace a partir del trabajo de Schank y Abelson en el año 1977; a finales de 1980, el programa de estados unidos DARPA, creó una serie de talleres que llevaron al desarrollo de una herramienta CBR llamada Cognitive System's ReMind [2].

La necesidad del CBR, nace a partir del hecho de que la computación debe ser cada vez más eficiente; por lo que si ya se sabe la solución a un problema, la idea es reutilizar este conocimiento y no volver a realizar todo el mismo proceso para obtener la respuesta.

Desde hace muchos años han existido esfuerzos contundentes con respecto a la solución eficiente y reutilización de conocimiento, ejemplo de ello son los patrones de diseño y el case based reasoning [2].

Esta es una técnica que ha permitido construir sistemas que mejoren la forma de dar soporte y atención a clientes por ejemplo, así como también se ha explotado su uso en aplicaciones médicas y legales.

El sistema de pronósticos para un taller mecánico, es un sistema que consiste en una herramienta que ayude a los talleres de automóviles y sus clientes a determinar con una mejor exactitud la vida útil de cada una de las reparaciones realizadas en sus vehículos.

Existen algunos de los tipos de mantenimientos que se le dan a un automóvil y que es de conocimiento de los choferes, como por ejemplo cada cuánto se debe realizar cambios de aceite, filtros, escobillas, etc.; Existen también estándares dados por los fabricantes sobre cada cuánto tiempo se deben ejecutar revisiones de las diferentes partes del automóvil; la herramienta acá especificada, tiene como objetivo principal indicar a los dueños de los automotores, pero no existe actualmente en el mercado investigado, una herramienta que sea capaz de indicar a la hora de facturar, la fecha estimada de la próxima revisión a causa del mismo problema recién tratado.

Con éste sistema, será posible transformar el proceso de reparaciones de automóviles, ya que la idea es que cada vez que una persona se acerque al taller mecánico para realizar un trabajo en su carro, el sistema sea capaz de decirle cuándo deberá regresar para realizarle el mantenimiento respectivo, de forma tal que el usuario no tenga que esperar a que se vuelva a dañar para llevarlo nuevamente al taller.

Una de las temáticas más importantes, es poder crear una cultura donde el chofer sepa cuánto tiempo le va a durar una reparación, con lo que entonces él podrá prevenir tanto económicamente la siguiente inversión que tendrá que realizar al automóvil, así como ayudarse con la planificación del tiempo en el momento que deba regresar al taller mecánico.

Inicialmente, el taller mecánico debió adaptarse a la utilización del nuevo sistema, ya que se estaba automatizando de igual forma muchas de sus tareas diarias que anteriormente se realizaban de forma manual. Una vez alimentado el sistema con datos iniciales o "Training Sets", y con los datos del día a día, el impacto del sistema se notará con los diferentes clientes del taller, debido a que como nuevo servicio, el taller le entregaba al cliente información referente a las fechas aproximadas de sus próximas revisiones o cambios de repuestos.

El sistema podrá ir mejorando cada vez más, basado en la información inicial además de que va ir adquiriendo experiencia conforme va pasando el tiempo, de forma tal que el producto final se estará "autorenovando", al tomar éste los datos diarios de las diferentes reparaciones, provocando que cada día se acerque más a la realidad.

En las siguientes secciones se discutirá sobre trabajos relacionados, donde podemos ver algunas comparaciones de la técnica relacionada vrs otras técnicas computacionales. Se mostrarán los objetivos iniciales del sistema, el planteamiento del modelo conceptual y la metodología seleccionada para realizar el desarrollo. Finalmente se cuenta con una sección de pruebas realizadas y las conclusiones del proyecto.

Trabajos Relacionados

Las aplicaciones de CBR pueden clasificarse principalmente en dos tipos [2]: Tareas de clasificación y Tareas de síntesis.

Las tareas de clasificación son aplicaciones que tienen ciertas características en común. Un nuevo caso se compara con los que ya existen para determinar qué tipo, clase o caso es. La solución del caso más cercano en la clase es reutilizado.

Este tipo de CBR se ha utilizado para realizar Diagnósticos, Predicciones, Asesorías, Controles de procesos y Planeaciones.

A nivel de diagnóstico, se han creado herramientas que ayudan a realizar diagnósticos a nivel médico y de fallas de equipos.

Con respecto a la predicción, se desarrollan herramientas que ayudan a pronosticar desde fallas de equipos hasta aspectos como rendimiento de la bolsa de valores.

Si hablamos de asesorías (assessment), por ejemplo se encuentran aplicaciones que ayudan con el análisis de riesgo, esto para ser utilizado en bancos y aseguradoras, así como también se puede ayudar para realizar estimaciones de costos de proyectos.

En cuanto a control de procesos, la técnica se puede utilizar para realizar controles de equipo de manufactura. Y si de planeación se habla, la técnica ayuda en procesos de planear por ejemplo viajes y también horarios de trabajo.

Las tareas de síntesis por otro lado, tienen como objetivo volver a crear una solución, combinando las soluciones previas, por ejemplo diseñar una nueva casa combinando partes de otras casas.

Existen pocos de estos sistemas, pero involucran tareas como Diseño, la creación de un nuevo artefacto por medio de la adaptación de elementos de previos.

Las tareas de síntesis también pueden ayudar con la planeación, en casos como por ejemplo, la creación de nuevos planes a partir de elementos existentes

En cuanto a ser aplicado en aspectos de configuración, se puede utilizar en por ejemplo la creación de nuevos horarios a partir de horarios ya existentes.

Si se comparan los dos tipos de tareas mencionadas anteriormente, se puede decir que las tareas de clasificación por lo general son mejores en muchos casos, sobre todo en casos computacionales que utilizan el inductive retrieval para clasificar las tareas [2].

EL CBR, ha resultado ser una técnica muy provechosa en diferentes ámbitos, tanto computacionales como no; existen muchos sistemas entre ellos podemos encontrar:

- PROTOS que es un sistema de diagnóstico médico en el ámbito otorrinolaringología [3]
- CASEY Sistema inteligente centrado en el dominio de los fallos cardíacos que combina Razonamiento Basado en Casos y Sistemas Basados en Reglas. [3]
- BOLERO utilizado para planear tratamientos médicos [3]
- IKBALS II y IKBALS III, proveen información sobre cómo pagar sobre compensaciones de accidentes y créditos respectivamente [4]
- Análisis de gestión de riesgos en software [5]

En cuanto a sistemas para automóviles, no se ha encontrado una herramienta como la acá propuesta; sin embargo si existen algunos datos estándares dados por compañías fabricantes sobre los periodos en que se debe realizar algún tipo de reparaciones preventivas; se encontró de igual forma, manuales de forma digital como por ejemplo manuales Mitchell, manuales ALLDATA [6], y se puede utilizar también la ayuda AutoData que son manuales en el que el fabricante describe un tiempo estándar en el que se debe reemplazar partes de los automóviles.

Durante mucho tiempo, se ha buscado los mejores mecanismos de inteligencia artificial para que sistemas de información puedan aplicarlos y obtener resultados de forma concisa. Existen múltiples técnicas que pueden ser utilizados en diferentes áreas; se muestra a continuación una comparación entre diferentes técnicas incluyendo al CBR.

En el cuadro 1, se muestra un estudio realizado para visualizar la eficiencia del método de razonamiento basado en casos vrs análisis estadísticos, se observa que los resultados finales arrojan un promedio de 93.2% con la técnica inductiva vrs un 61% con la técnica de análisis de discriminación lineal, mostrando de esta forma la eficiencia en cuanto a la resolución de casos utilizando el CBR.

Cuadro 1. CBR vrs Estadísticas [2]

Pruebas	Case-based induction	Análisis de discriminación lineal
1	93.4%	61%
2	93.4%	60%
3	92.6%	62%
4	93.2%	61%
5	93.5%	62%
Promedio	93.2%	61%

Comparación del CBR vrs Sistemas Expertos basados en reglas

En el cuadro 2, se aprecia una comparación de la implementación con el razonamiento basado en casos vrs sistemas basados en reglas.

Cuadro 2. CBR vrs Sistemas Expertos [2]

	Sist. basados en reglas	CBR
Area del problema	Problemas cortos, muy bien entendidos, fuerte dominio de la teoría, estables en el tiempo	Amplios, pobremente entendidos, débil dominio de la teoría, dinámico en el tiempo
Representación del conocimiento	Casos reales y reglas IF-THEN	Casos
El sistema provee	Respuestas	Precedentes
Explicación por	Trazo de reglas que se dispararon	Precedentes
El sistema puede aprender	No, usualmente requiere agregación de nuevas reglas de forma manual	Si, por la adquisición de casos

Técnica Inductiva (Inductive Retrieval)

Involucra una técnica llamada Inducción, desarrollada por investigadores del aprendizaje de máquinas, donde la idea es extraer las reglas o construir un árbol de decisión basados en los datos del pasado. En los sistemas CBR, el caso se analiza por un algoritmo de inducción para producir un árbol de decisión que clasifica o indexa los casos. El algoritmo más utilizado es el ID3 [2]

El ID3 requiere un atributo a ser precedido (bueno, malo, muy bueno, muy malo, por ejemplo), por lo que hay que buscar cuáles son los índices que nos van a dividir el árbol. El árbol puede dividirse en varios atributos que nos vayan indicando el camino para llegar a resolver el caso [2], se muestra un ejemplo de este proceso en la figura 1.

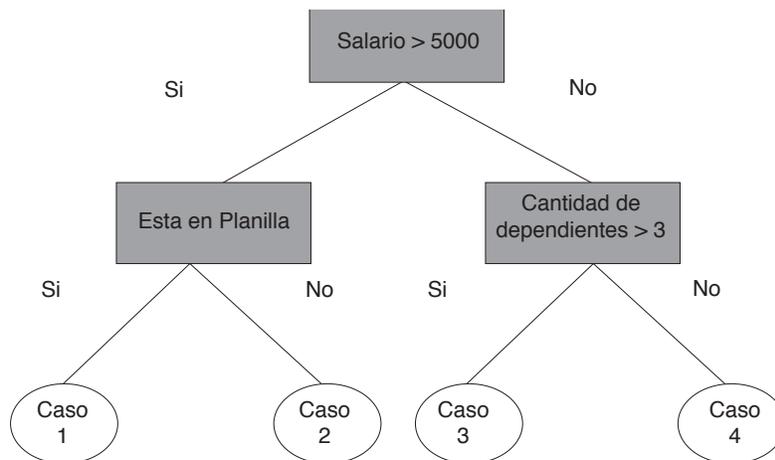


Figura 1. Técnica Inductiva

Ventajas y Desventajas del Case-Based Reasoning

Existen una numerosa cantidad de ventajas utilizando el CBR, en dominios donde existe poco dominio de la teoría, los modelos razonadores no son prácticos. Cuando la relación entre los atributos de los casos y la solución o resultado no se entiende bien para representarlo en reglas, o cuando el radio de casos que son “excepciones a la regla” es muy alto, los sistemas basados en reglas son poco prácticos. CBR es especialmente útil en este tipo de situaciones ya que modela las excepciones y los casos [7].

El CBR es también muy práctico a la hora de explicar o justificar una solución. Cuando la teoría del dominio es débil, es difícil justificar o explicar una posición. Buscar una analogía con un caso parecido en el pasado puede ser un mejor argumento. CBR soporta el aprendizaje en dominios donde no se cuenta con una fuerte comprensión del modelo de dominio [7].

Existen también desventajas en utilizar el CBR, pues si no se cuenta con suficientes casos similares, la solución que se obtenga puede ser inapropiada. El CBR también, puede que no reconozca un nuevo tipo de problema, esto es cuando un nuevo caso se distingue de casos anteriores por una característica que no está representada en los índices, entonces el CBR no va a poder reconocer la distinción [7].

Los sistemas CBR son relativamente fáciles de construir. Sin embargo es difícil que los expertos expliquen sus reglas de decisión, por lo general son personas que pueden contar historias sobre sus experiencias, lo cual facilitan el desarrollo de los casos [7].

Objetivos del Proyecto

El sistema de Pronósticos de Taller, viene a automatizar funciones diarias como por ejemplo asignación de tareas entre empleados, control y consulta de reparaciones realizadas, control y manejo de clientes, facturación entre otros, sin embargo, al desarrollar este sistema, el objetivo principal es que, con base en información sobre los clientes, sus automóviles y las reparaciones que se les ha realizado anteriormente, pueda generar entonces un diagnóstico sobre la ocurrencia de fallas en el tipo de reparación realizada.

Como puntos importantes a destacar, debe ser que el sistema debe ser lo suficientemente amigable para que personas que no están familiarizadas con el manejo de altas tecnologías, adopten el sistema sin mayor problema y que lo vean como una herramienta que les ayude a mejorar en sus tareas diarias.

Lo acá planteado pretende construir una base de datos en constante crecimiento que permita aplicar la técnica de razonamiento basado en casos de forma tal que el software pueda con el tiempo tener mayor exactitud a la hora de que se realicen las predicciones para resolver cuánto es la vida útil de una reparación en específico; por lo que el proyecto en su forma principal, contempla el desarrollo e implementación de un algoritmo de pronóstico de vida útil, inicialmente utilizando datos entregados por el taller, de forma que se cargue a la base de datos un set inicial para que el algoritmo empiece a realizar análisis y a almacenar los resultados.

Idealmente, la base de datos con reparaciones, se integrará con varios talleres, de forma tal que se pueda ir construyendo una base de datos de conocimiento más globalizada, y por lo tanto con el tiempo las predicciones puedan ser más exactas, no importando así si el cliente cambia de taller, ya que los datos pueden ser compartidos entre la misma red de talleres.

Metodología de Desarrollo

En el escenario para el que se realizó el trabajo, se encuentra con que el personal del taller mecánico no tiene experiencia en el desarrollo e implementación de sistemas de información, por lo que la metodología utilizada fue un prototipo incremental, de forma tal que los principales afectados pudieran ir observando las diferentes funcionalidades del sistema conforme se avanza en el proyecto [9].

Se planteó un ciclo de vida de desarrollo de software estándar con las siguientes etapas:

- Definición de requisitos del sistema
- Análisis del sistema
- Especificación de los requisitos del prototipo
- Diseño del prototipo
- Desarrollo o codificación del prototipo
- Implementación y prueba del prototipo
- Refinamiento iterativo de las especificaciones del prototipo
- Implementación del sistema final

Tomando en cuenta los resultados encontrados con respecto a la efectividad de diferentes técnicas, se determinó que en este caso el Case-based reasoning (CBR), o el razonamiento basado en casos, podía adaptarse al problema a resolver, ya que se parte de que los problemas a resolver tienen cierto grado de comportamiento, y tal como se ha explicado anteriormente, es el proceso de resolver un nuevo problema basado en la solución de problemas similares que hayan ocurrido en el pasado [10] aplica de forma casi perfecta al taller mecánico.

De acuerdo con A. Aamodt, E. Plaza [11] el razonamiento basado en casos no solamente es un método de razonamiento computacional, sino que también es la forma en que el pensamiento humano se comporta diariamente para resolver problemas. Un argumento más radical, indica que todo razonamiento se basa en la experiencia de casos del pasado.

Leake David [10], nos indica que tal como lo hace el cerebro humano, contamos con un almacenamiento de datos creando una memoria para el CBR, de forma que se tengan tanto el problema como la solución al problema. Cada vez que se presente un nuevo caso o problema, el sistema debe de ir a buscar alguna similitud con los casos existentes y resueltos.

Dadas las definiciones anteriores, nos enfocamos entonces a los siguientes pasos:

1. Obtener Información:
 - a) Diseñar un algoritmo que permita buscar en la base de datos casos anteriores que sean relevantes al caso en cuestión.
2. Reutilización:
 - a) Mapear la solución basada en el caso previo al problema y adaptarlas al nuevo caso
3. Revisar:
 - a) Contando con la solución previa, realizar el pronóstico de la siguiente ocurrencia y revisar resultados.
4. Retener:
 - a) Después de que la solución se ha adaptado al problema, almacenar los resultados y la experiencia como un nuevo caso en la base de datos.

A manera de comprender mejor lo explicado acá, en la figura 2 se muestra el proceso realizado en el Razonamiento Basado en Casos.

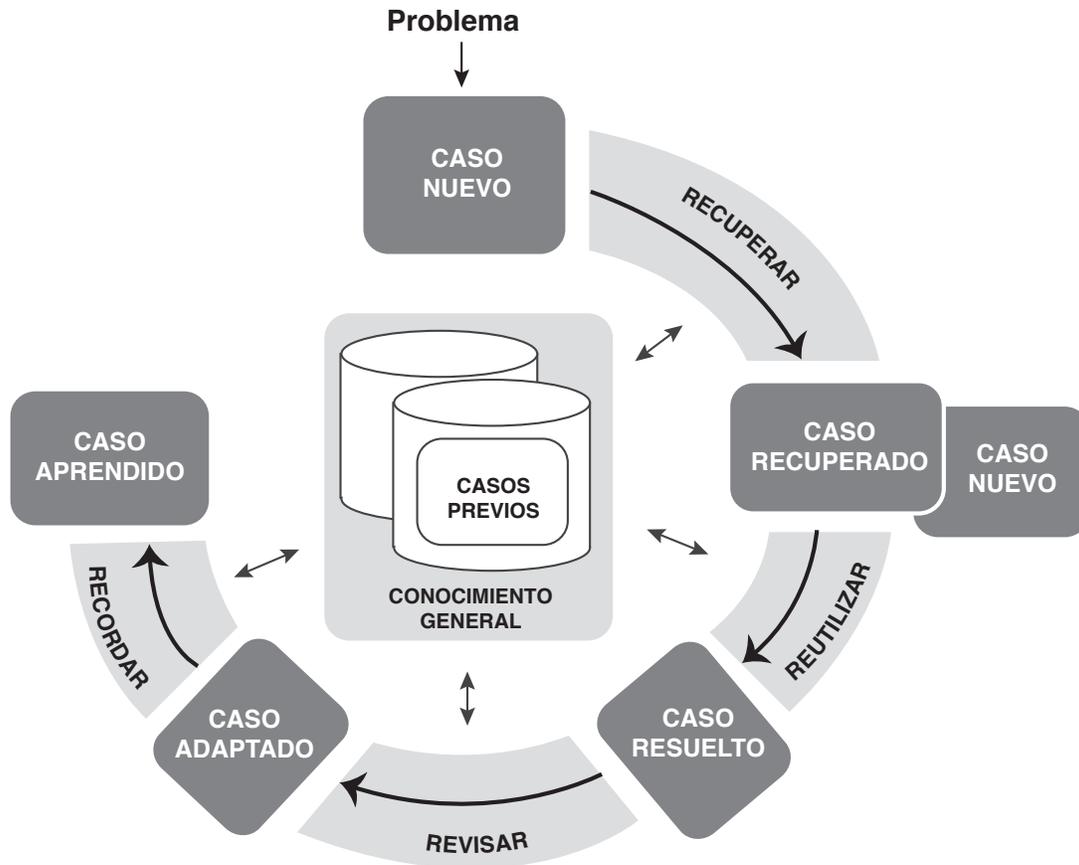


Figura 2. Razonamiento Basado en Casos [12]

Análisis y Diseño

Como siempre, al inicio de todo desarrollo, es importante rescatar los puntos más importantes involucrados dentro del proceso a automatizar, de forma que el desarrollador pueda empezar a familiarizarse con el ambiente.

Un modelo de conceptual, captura los tipos más importantes de objetos en el contexto del sistema. Los objetos del dominio representan las cosas que existen o los eventos que suceden en el entorno en el que trabaja el sistema [8]. En la figura 3, se visualiza los conceptos más importantes, identificados, que intervienen en el sistema.

En la figura 4, se muestra un diagrama de la forma en que se estructurarán los módulos del sistema.

La arquitectura del sistema se modelará tipo Cliente-Servidor. En el cliente se estará ejecutando la capa de presentación, y en el servidor, la capa de lógica del negocio y la base de datos. La arquitectura debería tener también los componentes o módulos internos generales para hacerla más pertinente, para un mejor entendimiento se muestran los subsistemas en la figura 5.

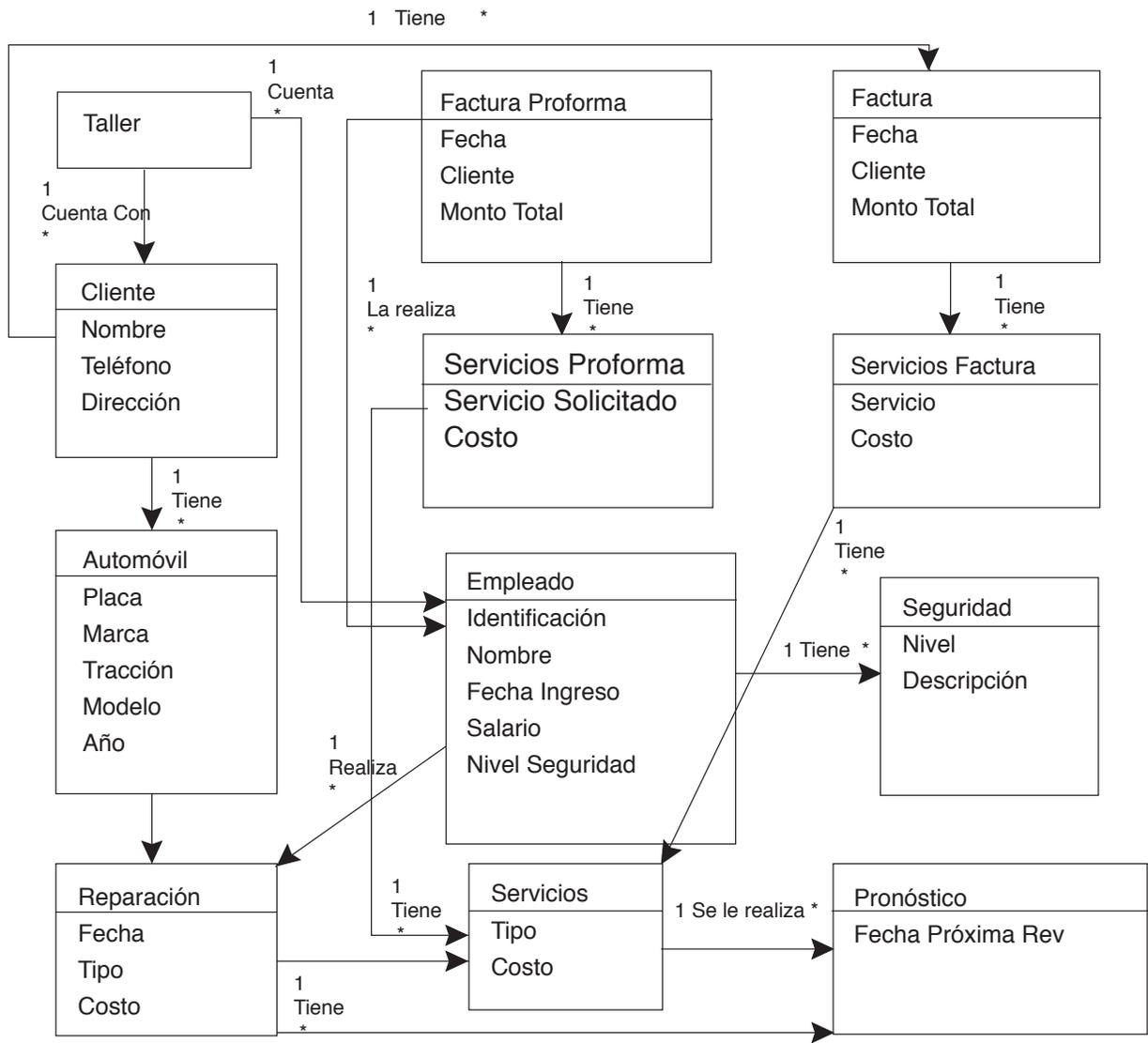


Figura 3. Modelo Conceptual

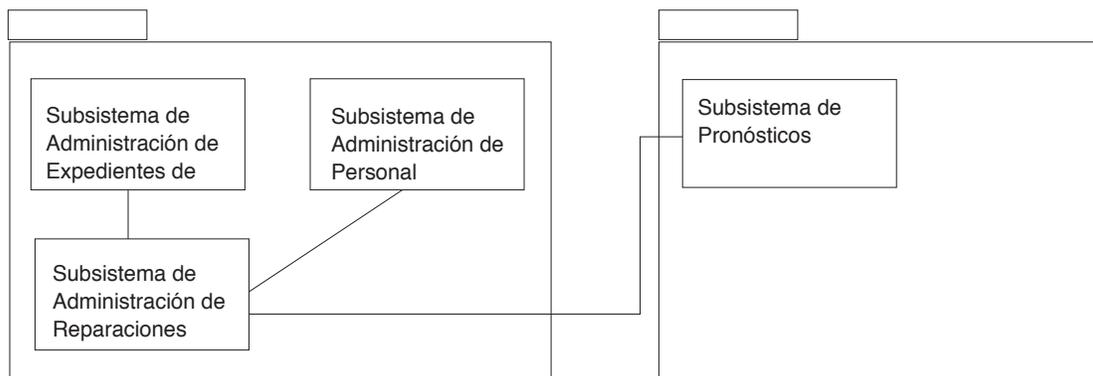


Figura 4. Arquitectura de subsistemas

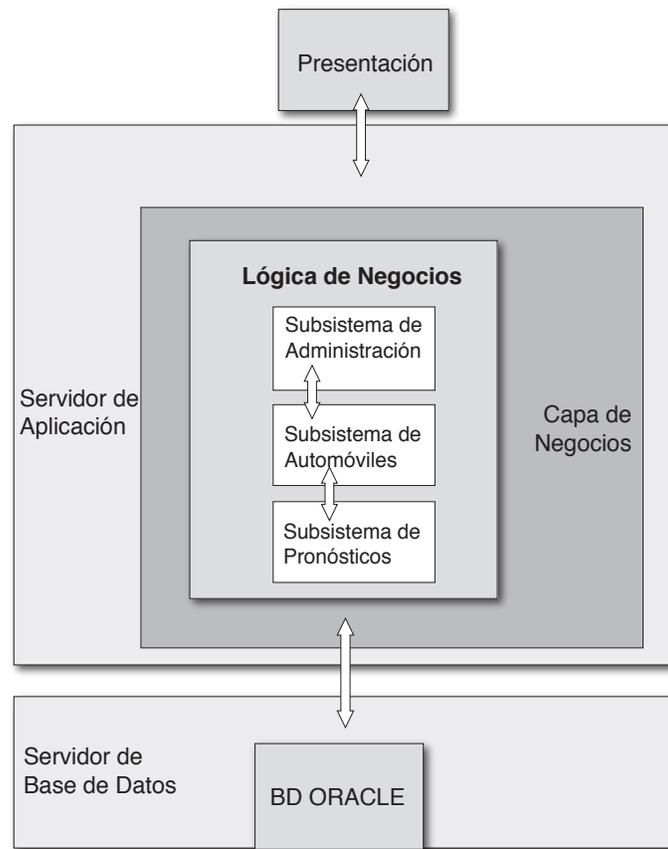


Figura 5. Arquitectura del sistema

Desarrollo

Árbol de decisión

Haciendo utilización de la técnica inductiva del CBR, se procede a identificar los índices pertinentes de acuerdo con el problema a resolver. En este caso se procedió a realizar una jerarquía de prioridades por los índices más importantes, de acuerdo con el conocimiento del usuario experto.

Los índices definidos han sido:

- Tipo de Combustible
- Año del automóvil
- Tracción
- Modelo
- Marca
- Tipo de motor

Cada vez que un automóvil llega al taller para ser reparado, se almacena en la base de datos la fecha, el tipo de servicio brindado, y las diferentes características del automóvil, de esta forma se va creando la base de datos de los diferentes casos, conforme la base de datos vaya creciendo, la búsqueda obtendrá información mucho más certera.

A la hora de realizar la facturación, el sistema irá a la base de datos y almacenará la información actual como un nuevo caso. Primero se busca si el cliente ya ha recibido este tipo de servicio para el mismo automóvil anteriormente. De ser así, el sistema procederá a almacenar un nuevo caso donde se indicará la cantidad de días de vida útil que tuvo la reparación reciente, y se almacenará dicho dato junto con el pronóstico realizado anteriormente; luego se procederá a realizar una búsqueda de todos los casos anteriores similares o el más cercano al servicio que acaba de ser brindado al cliente, con base a esto, el sistema calculará la cantidad de días de vida útil que se tiene en promedio para la reparación actual.

En caso de no conseguir un dato de casos similares, se tomarán datos del fabricante si existen en la base de datos.

Para definir cuáles son los criterios de búsqueda, se contempló con el usuario, de acuerdo a su juicio, la prioridad de búsqueda de casos en la base de datos, y esta es la prioridad asignada:

1. Misma marca, modelo, tracción, combustible, año y tipo de motor
2. Misma marca, modelo, año y motor
3. Misma marca, modelo y año de fabricación
4. Misma marca, modelo y motor
5. Misma marca, año y motor
6. Misma marca, modelo, tracción, combustible y año
7. Misma marca, modelo y año
8. Misma marca, modelo, tracción y combustible
9. Misma marca, modelo y tracción
10. Misma marca, modelo y combustible
11. Automóviles de la misma marca y modelo
12. Automóviles de la misma marca y motor
13. Automóviles de la misma marca y año
14. Automóviles que han recibido el mismo tipo de servicio
15. Automóviles de la misma marca.

Esta prioridad puede ser visualizada en la figura 6.

Resultados Obtenidos

Una terminado el desarrollo de acuerdo con los estándares definidos, se procedió a realizar pruebas para determinar si se cumplió a cabalidad con las expectativas del cliente, las pruebas realizadas fueron controladas en diferentes escenarios, para poner a prueba el pronóstico que realiza el sistema.

Se alimenta el sistema con una serie de casos y éstos fueron realizados junto con el experto en mecánica automotriz, estos casos son hipotéticos ya que el sistema al iniciar no cuenta con datos históricos del taller, y en muchos casos, es necesario que transcurran gran cantidad de días para comprobar su validez; se plantearon entonces los siguientes escenarios sin embargo no son datos reales, ya que el taller realiza reparaciones que por lo general no es preciso volverlas a hacer antes de un año.

El primer caso, es el de un Hyundai Accent, año 1995, presenta un fallo donde la aceleración no es constante, y tiene problemas en las bujías.

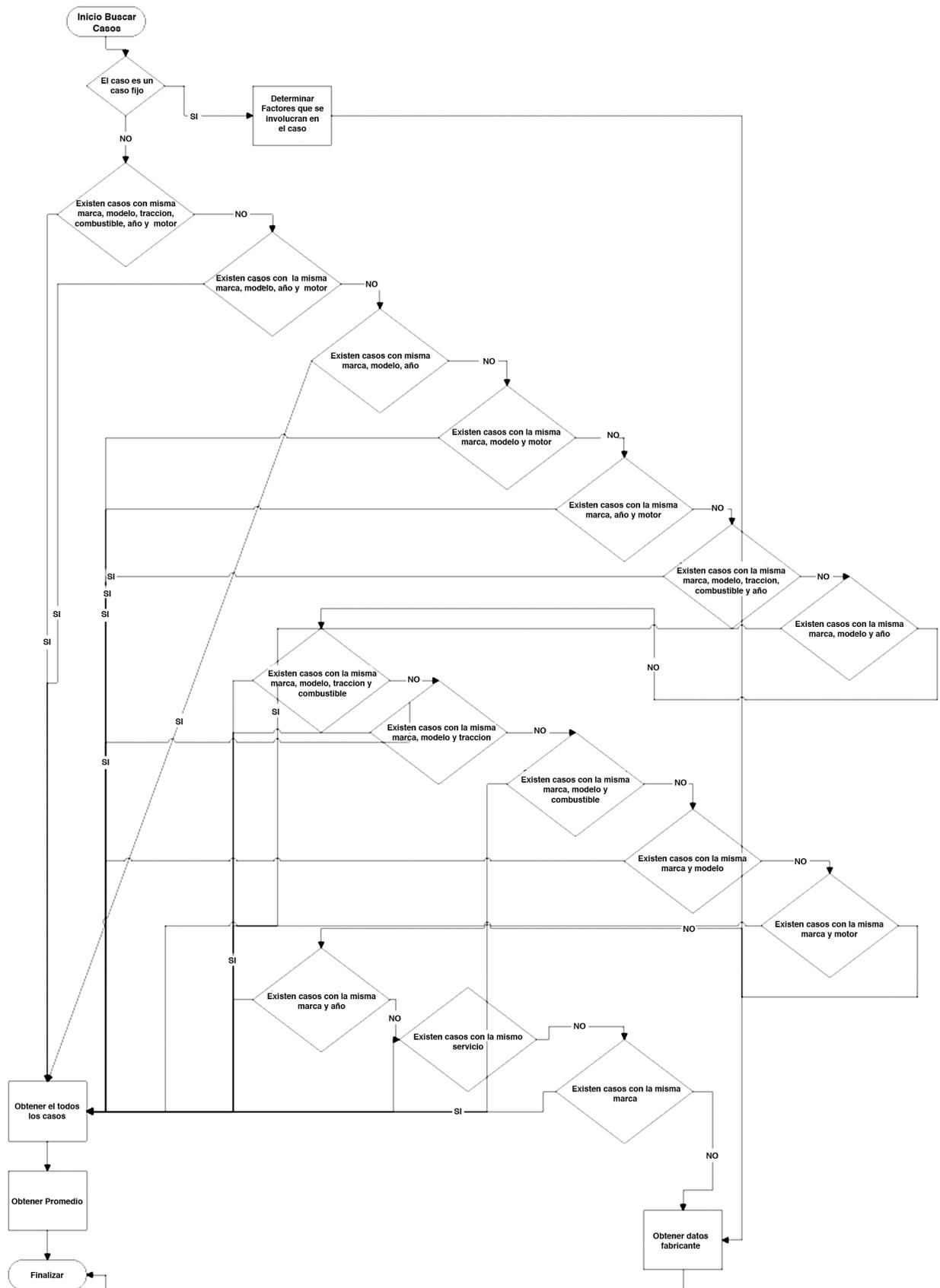


Figura 6. Árbol de Decisión

El primer caso, es el de un Hyundai Accent, año 1995, presenta un fallo donde la aceleración no es constante, y tiene problemas en las bujías.

De acuerdo con los datos del sistema cargados a partir de instrucciones del fabricante, un automóvil de este tipo se le deberá hacer cambio de bujías cada 48 meses o cada 60mil kilómetros.

El automóvil se reparó en febrero del 2003, y el kilometraje en aquel momento era de alrededor de 689000. El sistema encontró con que debería regresar 48 meses después es decir en enero del 2007 o cuando cumpliera con los 749000 kilómetros.

El automóvil llegó nuevamente en Octubre del 2006, con 749100 kilómetros, por lo que el pronóstico ahora es de 45.3 meses y de 60100 kilómetros. Como se puede ver en este caso, el conductor hizo un promedio mayor de kilómetros por mes por lo que la fecha del nuevo cambio se adelantó. Estos valores se vieron afectados, ya que anteriormente en la base de datos se encontraban registrados el mismo tipo de servicio para este mismo automóvil, por lo que se toma como base los días y kilometraje de los servicios anteriores, además de los días promedios y kilometraje que tardó en ésta última reparación. Como dato importante es preciso mencionar que en este caso se utilizaron datos de repuestos de bujías de punta de diamante, los cuales tienen una mayor vida útil.

El siguiente caso se trata de un automóvil al que se le cambió la faja de distribución, de acuerdo con la base de datos, su siguiente cambio antes de que el motor falle, deberá ser alrededor de 4 años más y cuando se tenga un máximo de 190000 kilómetros.

De acuerdo con los datos obtenidos del sistema AutoData y validándolas con el juicio experto, se determina que 80mil kilómetros es el dato exacto de cuándo debe ser cambiada la faja de distribución.

Otro automóvil de la misma marca y modelo le fue reemplazado la faja de distribución en Diciembre de 2007, por lo que el sistema buscó datos en la base de datos, al ser la primera vez que visitaban el taller, entonces el sistema tuvo que buscar los datos de automóviles revisados anteriormente, y le pronosticó que su vida útil sería hasta que alcanzara los 270050 kilómetros, es decir 80000 kilómetros.

El tercer caso con el que se puso a prueba, toma en cuenta un automóvil que se le cambió el aceite de Transmisión en Diciembre del 2007, dicho filtro debería de cambiarse en 1 año o 20mil kilómetros. Se muestra la pantalla con los resultados obtenidos.

Con el cuarto caso, se pone a prueba un automóvil al que se le cambió los compensadores en Diciembre del 2006, la vida útil de dicha reparación de acuerdo con los datos de AutoData y el criterio experto nos dice que es de 1 año o 15mil kilómetros.

El mismo automóvil regresa al taller hasta marzo del 2008 con un total de 100500 Km, lo cual indica que realizó un promedio de 500 kilómetros más de lo pronosticado lo que implica que para la próxima revisión se regresará cuando tenga 115500 Kilómetros recorridos.

Para validar los resultados del sistema, se elaboró una pequeña encuesta a tres diferentes talleres, exponiendo los casos y resultados pronosticados por el sistema, de forma tal que validen la correctitud de los datos de basado en su criterio experto.

De acuerdo con los datos mostrados a los diferentes expertos en el área, se tiene que por lo general los talleres mecánicos no cuentan con herramientas informáticas especializadas que le ayuden a generar un pronóstico sobre la vida útil de las reparaciones, y que algunos aunque cuentan con algún otro tipo de software que les complementa su conocimiento, en realidad no cuentan con una herramienta que les facilite los procesos diarios de documentaciones sobre

reparaciones realizadas, facturación y que además se obtenga un valor agregado para el cliente a la hora de indicarle su próxima fecha de revisión.

Entre los casos presentados a los talleres, se puede concluir que todos los expertos concuerdan con el hecho de que los resultados arrojados por el sistema son confiables de acuerdo con su experiencia.

Los encuestados también están muy anuentes a utilizar dicho sistema, y consideran que sería de mucha utilidad tanto para ellos como para el cliente, ya que además de agilizarles el proceso de facturación y registro de reparaciones, clientes, preformas, etc, le darían al cliente un valor agregado al indicarles el promedio de la vida útil de la reparación recién hecha.

Conclusiones y Trabajo Futuro

En sistemas de pronóstico que incurren en un árbol de decisión con un comportamiento un tanto estático, la mejor técnica a utilizar es el razonamiento basado en casos de forma inductiva.

A la hora de realizar un árbol de decisión es de suma importancia lograr con el usuario un consenso sobre cuáles serán los índices y sus respectivas prioridades a utilizar en la búsqueda de los casos.

El desarrollo de proyectos de sistemas de información para ser utilizados por personas que están bastante ajenas al área, es mucho mejor realizarlo por medio de un prototipo incremental, ya que es más fácil la comprensión por parte del usuario.

El sistema de pronósticos es una herramienta la cual irá evolucionando con el tiempo y la cantidad de datos serán los que hagan que los pronósticos sean más adecuados a la situación de nuestro país, sin embargo las pruebas que se han podido realizar son hipotéticas basándose en el conocimiento experto del dueño del Taller, ya que éste no mantenía registros detallados sobre las reparaciones que se han realizado a los diferentes automóviles en los últimos años.

En una futura mejora del proyecto, se recomienda hacer uso de otros índices adicionales como por ejemplo el tipo de usuario del automóvil y género ya que esto haría que el pronóstico se adecue un poco mejor.

Una variante también que se puede realizar es hacer intervención por parte del usuario en el pronóstico, de forma tal que se tome en cuenta también el juicio experto.

Como mejora también al sistema, se recomienda realizar un módulo que realice envíos de mensajes y/o correos a los clientes para hacerles recordatorios sobre sus próximas revisiones.

Crear una red de talleres con información compartida sobre las diferentes reparaciones realizadas a los automóviles, brindaría a los usuarios una mejor información con respecto a su automóvil y su respectivo pasado, de forma que cuando el automóvil cambie de dueño y sea llevado a un taller diferente, no se pierda el historial, y mas bien contribuya con una mejora en los pronósticos.

Sería recomendable también agregar otro tipo de información que puedan convertirse en índices relevantes para la toma de decisiones como por ejemplo el área en el que el automóvil transita constantemente, ya sea área rural o urbana, género del conductor, etc.

Referencias

- [1] W. J. S. B. a. M. C. Boris Campillo-Gimenez, «Improving Case-Based Reasoning Systems by Combining K-Nearest Neighbour Algorithm with Logistic Regression in the Prediction of Patients' Registration on the Renal Transplant Waiting List,» PMC, 2013.



- [2] I. Watson, *Applying Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise Systems*, Morgan Kaufmann, 1997.
- [3] L. R. Wong Portillo, «Un modelo de Razonamiento Basado en Casos para la Captación de Requisitos en el desarrollo de proyectos de software,» 2012.
- [4] J. Zelesnikov, «InfoJur,» [En línea]. Available: <http://www.egov.ufsc.br/portal/sites/default/files/anexos/2662-2656-1-PB.htm>.
- [5] S. M. R. Rodríguez, «Modelo de un sistema de razonamiento basado en casos para el,» vol. 4, 2011.
- [6] ALLDATA, ALLDATA Diagnostic and Repair Information.
- [7] D. B. Morris, «Case Based Reasoning,» AI/ES Section of the American Accounting Association, 1995.
- [8] I. Sommerville, *Software Engineering*, Addison-Wesley, 2010.
- [9] D. B. Leake, «CBR in Context: The Present and Future,» 1996. [En línea]. [Último acceso: 2 11 2014].
- [10] E. P. Agnar Aamodt, «Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches,» vol. 7, nº 1, 1994.
- [11] Y. R. C. Y. T. R. Dasiel Cordero Morales, «Sistema de Razonamiento Basado en Casos para la identificación de riesgos de software,» 2013.
- [12] G. J. Jacobson I, « El Proceso Unificado de Desarrollo de Software,» 2005.
- [13] J. M. F. Florentino, «Sistemas híbridos neurosimbólicos: Una revisión, Inteligencia Artificial,» 2000.

Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia

Trihalomethane prediction modelling in water distribution systems: calculation of the mean residence time

Andrés Araya-Obando¹, Mark Jones-Sánchez²,
Luis G. Romero-Esquivel³

Fecha de recepción: 12 de setiembre de 2018
Fecha de aprobación: 25 de abril de 2018

Araya-Obando, A; Jones-Sánchez, M; Romero-Esquivel, L.
Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 167-178.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4126>



- 1 Investigador de la Escuela Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jobando@tec.ac.cr
- 2 Estudiante de la carrera en Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mkjones0505@gmail.com
- 3 Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: lromero@tec.ac.cr

Palabras clave

THMs; modelos de predicción; agua de consumo humano; sistemas de distribución; ensayos con trazadores.

Resumen

El contacto del cloro con la materia orgánica puede producir subproductos de desinfección tales como los Trihalometanos (THMs). Estos compuestos son considerados de riesgo para la salud y su formación se ve influenciada por el pH, temperatura, tipo de materia orgánica, dosis del desinfectante y el tiempo de reacción. No obstante, dados los costos asociados a los análisis en laboratorio, comúnmente se utilizan modelos mecánicos y estadísticos para su predicción. Sin embargo, la determinación del tiempo medio de residencia (TMR) en las redes de distribución requiere de herramientas computacionales que demandan tiempo e inversión por lo que es necesario considerar otros métodos para su estimación. En ese sentido, el presente artículo profundiza en los principales aspectos que se deben considerar para la construcción de un modelo de predicción, así como en el análisis de dos métodos de cálculo para la determinación del TMR en redes de distribución empleando trazadores. Para esto último, se hicieron pruebas en una red de distribución a escala piloto conformada por tuberías de PVC de 12 mm de diámetro. Se utilizó cloruro de sodio como trazador mediante adición continua. Se determinaron los TMR en dos puntos de muestreo y se obtuvo una diferencia de 2,40% y 3,31% respectivamente, demostrando que son dos métodos precisos y de fácil comprensión. Finalmente, se concluye que los modelos construidos a partir de regresiones múltiples pueden ser potencialmente utilizados en Costa Rica, dado que se pueden construir de manera sencilla a partir de condiciones locales.

Keywords

THMs; prediction models; water for human consumption; distribution systems; tracer test.

Abstract

Contact of chlorine with organic matter can produce disinfection byproducts such as Trihalomethanes (THMs). These compounds are considered to be hazardous to health and their formation is influenced by pH, temperature, type of organic matter, dose of chlorine and reaction time. However, given the costs associated with laboratory analyzes, mechanical and statistical models are commonly used for their prediction. Nevertheless, the determination of the mean residence time (TMR) in distribution networks requires computational tools that demand time and investment, so it is necessary to consider other methods for their estimation. In this sense, the present article emphasizes into the main aspects that must be considered for the construction of a prediction model, as well as the analysis of two calculation methods for the determination of TMR in distribution networks using tracers. For the latter, tests were carried out on a pilot scale distribution network made up of 12 mm diameter PVC pipes. Sodium chloride was used as a tracer by continuous addition. TMRs were determined at two sampling points and a difference of 2.40% and 3.31% respectively were obtained, demonstrating that both calculations methods are precise and easily understood. Finally, it is concluded that the models constructed from multiple regressions can be potentially used in Costa Rica, since they can be constructed simply from local conditions.

Introducción

La presencia de subproductos de desinfección se debe a reacciones entre los agentes químicos desinfectantes y la materia orgánica disuelta en el agua [1]–[3]. A lo largo de las últimas décadas, la investigación relacionada con la formación de los subproductos de desinfección en redes de distribución se ha enfocado en i) identificar nuevos subproductos de desinfección [4]; ii) evaluar los efectos en la salud pública atribuibles a la presencia de estas sustancias en términos, principalmente, de la ingesta y la exposición [2], [5]; iii) desarrollar reglamentación con el fin de gestionar el riesgo entre la desinfección del agua y la producción de DBPs [2], [6]; iv) caracterizar la calidad del agua y las condiciones en los sistemas de tratamientos que propician la formación de DBPs [2], [3], [7]–[9]; v) desarrollar, evaluar tecnologías y modificar los sistemas de tratamiento para el control de los DBPs [10]–[12]; y finalmente, vi) cuantificar la formación y la distribución de los DBPs en los sistemas de distribución de agua desde la fuente hasta el consumidor [1], [13]–[22]

A pesar de que se tienen identificadas cerca de 600 especies distintas de subproductos de desinfección [4], sólo algunos de ellos se catalogan como sustancias tóxicas [23]. No obstante, surge especial interés en el caso particular de los Trihalometanos (THMs) ya que se presume que están relacionados con el cáncer renal y del tracto digestivo, efectos reproductivos, problemas con el hígado y riñones [1], [2], [5]. Específicamente, los THMs de mayor potencial de formación son: cloroformo (CHCl_3), bromodicloroformo (CHCl_2Br), dibromocloroformo (CHClBr_2) y bromoformo (CHBr_3) [1], [8] los cuales son medibles y reportados como Trihalometanos Totales (TTHM) [17]. En el caso de Costa Rica, la cantidad máxima permitida de THMs totales en el agua de consumo es de $100\mu\text{g/L}$ para el bromoformo y dibromoclorometano, $60\mu\text{g/}$ para el bromodiclorometano y $200\mu\text{g/}$ para el cloroformo.

Partiendo del hecho de que las redes de distribución de agua potable constituyen un reactor químico y biológico a gran escala con altos tiempos de residencia [24], se han desarrollado modelos empíricos de predicción para estimar los TTHM, así como, los compuestos individuales de formación [1], [4], [6]. El contar con un modelo de predicción de THMS facilita, entre otras cosas, identificar estrategias operacionales para minimizar su formación, seleccionar puntos de muestreo para el control de calidad, tomar decisiones para la gestión de riesgos asociados a la salud pública, establecer normas más estrictas de control y estimar necesidades de infraestructura para mejorar la calidad del agua. En el marco del contexto en mención, el presente artículo profundiza en los principales aspectos que intervienen en la formación de los THMs, explicando a su vez, la conceptualización y construcción de los modelos de predicción mecánicos y estadísticos utilizados en redes de distribución.

A pesar de que los modelos permiten predecir las concentraciones de THM en un instante dado, una de sus principales limitaciones es la determinación del tiempo de reacción. En el caso de las redes de distribución, se debe determinar el tiempo medio de residencia (TMR). Para ello, se requiere de modelos computacionales como EPANET [13], [16] o a través de sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) [14]. Sin embargo, este tipo de herramientas requieren de tiempo y de inversión de recursos. Por tanto, en el presente trabajo se evalúa el cálculo de tiempos de residencia en una red construida a escala piloto a la cual se le aplica un trazador. Posteriormente, se analizan dos métodos de tratamiento de datos de los resultados de un ensayo de trazadores con el fin de proveer una metodología de análisis de bajo costo para la determinación del tiempo medio de residencia del agua en los puntos de control de la red de distribución en donde se requiera validar y dar seguimiento a la formación de los THMs.

Formación de THMs en el agua

Los niveles de THMs formados como resultado de la desinfección en redes de distribución de agua dependen de varios factores como la concentración de materiales precursores, el tiempo de reacción (relacionado con el tiempo medio de residencia del agua en las redes de distribución), el tipo y dosis del desinfectante y algunas características particulares de la calidad del agua (cuadro 1).

Cuadro 1.- Principales parámetros que intervienen en la formación de THMs.

Parámetro	Descripción
Materia Orgánica	La materia orgánica caracterizada mediante Carbón Orgánico Total (COT) y disuelto (COD), es el principal precursor. Las sustancias húmicas son las principales precursoras.
Bromuros	Los bromuros son rápidamente oxidados por el cloro a ácido hipobromoso (HOBr), el cual, reacciona con la materia orgánica produciendo THMs bromados considerados más tóxicos.
Desinfectante	La tasa de formación de THMs aumenta con la dosis de cloro (Cl_2). Considerando una dosis fija de cloro, la producción de THMs se incrementa si aumenta la concentración de COD. No obstante, la mayoría de los modelos de cinética de formación utilizan la dosis inicial de Cl_2 , a pesar de que la concentración cambia durante la reacción.
pH	La producción de THMs aumenta con el incremento del pH. Una baja formación a pH cercano a 5 y una mayor tasa a pH cercano 9,4.
Temperatura (q)	La producción de THMs aumenta con la temperatura por lo que su producción cambia usualmente en verano respecto al invierno.
Tiempo de reacción	Más del 50% de la formación final de THMs se reporta desde pocos minutos a varias horas o días después de la adición del cloro.

Fuente: [1]–[3], [8], [15], [17], [25]

Modelos de predicción de THMs

Los modelos de predicción de THMs se clasifican en modelos mecánicos y estadísticos. Estos tipos de modelos son calibrados con una base de datos limitada por lo que en ocasiones se omiten términos para simular parámetros importantes y esto produce falta de fiabilidad si el valor de cualquier variable se encuentra fuera del rango de los datos de calibración [21]. De igual forma, la mayoría de los modelos existentes para la formación de DBPs son desarrollados estadísticamente por lo que son o resultan muy específicos del lugar y no serán confiables para las predicciones realizadas fuera del rango de las observaciones existentes [22]. A continuación, se presenta una descripción detallada de los modelos mecánicos y estadísticos.

Modelos mecánicos

Los modelos mecánicos están basados en presunciones de la química de la reacción de cloración. Debido a la complejidad de las reacciones de cloración y la materia orgánica, estos modelos no producen expresiones analíticas explícitas para cinética de formación del THMs. No obstante, se pueden integrar numéricamente para generar predicciones para las concentraciones de THM como una función del tiempo de reacción y condiciones de reacción iniciales particulares a la zona de estudio. Estos modelos parten del hecho que la formación de THMs está estrechamente vinculada con el consumo de cloro. Dicha afirmación se puede ejemplificar con la (*Ec01*) [15].

$$[TTHM]_T = k_{TC} \cdot (Cl_o - C_T) \dots\dots\dots(Ec01)$$

Donde, $TTHM_T$ se refiere al total de THMs en un tiempo “ T ”; k_{TC} es un indicador de la productividad de THMs ($\mu\text{g/L}$ TTHM por mg/L de cloro consumido); Cl_o corresponde a la concentración inicial de cloro (mg/L) y C_T se refiere a la concentración de cloro en un tiempo T . Nótese que la resta de estos últimos dos parámetros corresponde al consumo de cloro para un tiempo de reacción dado.

Este tipo de modelos permiten modelar de forma más práctica la distribución espacial de la formación de TTHM en todo el sistema de abastecimiento [4] a través de programas como EPANET y su complemento de Multi-Especies [6]. Basado en la *Ec01*, Clark [26] propuso un modelo de segundo orden [4], [6], [15] (*Ec02*).

$$[TTHM] = k_{TC} \left\{ Cl_o - \left[\frac{Cl_o(1-k_{AB})}{1-k_{AB}e^{-(1-k_{AB})ut}} \right] \right\} + TTHM_0 \dots\dots\dots(Ec02)$$

Donde $TTHM_0$ es la concentración inicial de trihalometanos totales, k_{AB} y u son parámetros provenientes de la ecuación de decaimiento de cloro. Con respecto al valor de k_{TC} , Clark & Sivaganesean [26] propusieron una ecuación para su determinación de acuerdo a las características y las condiciones del sitio en estudio, la cual se representa en la *Ec03* [6], [26]. De igual forma, Brown [17] argumenta que el valor de k_{TC} puede ser aproximado de manera gráfica mediante la pendiente de la línea de mejor ajuste de la correlación entre los TTHM formados y la cantidad de cloro consumido [17].

$$k_{TC} = e^{1,49} \cdot Cl_o^{0,48} \cdot TOC^{0,18} \cdot pH^{0,96} \cdot T_w^{0,28} \dots\dots\dots(Ec03)$$

Donde T_w es la temperatura del agua.

Modelos estadísticos

Los modelos estadísticos no se basan en presunciones sino más bien, en tratar de describir los datos experimentales mediante ecuaciones empíricas de mejor ajuste. Básicamente, la mayoría se basan en el modelo multivariable propuesto por Amy et al. [25] (*Ec04*).

$$TTHM = k \cdot (t)^a \cdot (C_o)^b \cdot (TOC)^c \cdot (\theta)^d \cdot (pH)^e \cdot (Br)^f \cdot (UV_{254})^g \dots\dots\dots(Ec04)$$

Donde, $TTHM$ corresponde a los Trihalometanos Totales (mg/L), k es la constante de reacción (determinada a partir del estudio de la cinética de formación), t es el tiempo de reacción(s) que corresponde al tiempo medio de residencia en el caso de las redes de distribución, C_o es la concentración del cloro al tiempo cero (mg/L), θ es la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), UV_{254} es la absorbancia UV a 254 nm (m^{-1}), Br es la concentración de bromuro (mg/L) y a-g son las constantes de reacción determinadas a partir de las regresiones [25], [27].

Por su parte, Basiouny *et al.* [28] propone la construcción del modelo estadístico en varias etapas. La primera, contempla trabajo de laboratorio en la cual se toman muestras de agua cruda o tratada (previo a la dosificación) y mediante la adición de pequeñas dosis de cloro controladas se hacen determinaciones de THMs y los parámetros de interés. La segunda etapa contempla el desarrollo del modelo matemático a partir de los datos de laboratorio. La tercera etapa comprende un plan de muestreo en varios puntos uniformemente distribuidos a lo largo de la red, con el fin de validar el modelo matemático [28].

Principalmente, se pueden emplear modelos de regresión múltiple lineal con transformaciones logarítmicas tanto para las variables dependientes como las independientes (log-log) o bien, modelos de regresión no lineales [25] los cuales se pueden simplificar identificando las variables más significativas.

Respecto a la cantidad de determinaciones y parámetros que se requieren para la construcción del modelo, la literatura muestra criterios muy variados. Por ejemplo, Rivadeneyra *et al.* [29] realizaron un estudio donde contemplaron 87 parámetros y 892 análisis de laboratorio, no obstante, el modelo finalmente lo desarrollaron con 7 parámetros que demostraron significancia [29]. Por su parte, Basiouny *et al.* [28] desarrolló un modelo con 3 parámetros con los datos de cinco puntos de muestreo en la planta y 6 puntos distribuidos en la red, para un N=27 obteniendo un R² de 0,92.

En el cuadro 2 se presenta un resumen de los principales modelos de predicción reportados en la literatura. A pesar de que la mayoría de estos modelos han sido desarrollados en laboratorio, algunos de ellos se basan en mediciones realizadas a lo largo de la red.

Tiempo de reacción en redes de distribución de agua

El tiempo medio de residencia del agua se puede determinar mediante la aplicación de un trazador y aplicando los conceptos fundamentales de los modelos de flujo en reactores. DiGiano *et al.* [30] proponen que en redes de distribución se utilice el método de adición continua del trazador conocido como pulso negativo en que se determina la desaparición del trazador en un punto de muestreo determinado [30]. Para esa condición destacan dos modelos de análisis de los datos discretos obtenidos del ensayo de trazadores para determinar el tiempo medio de residencia. El primero se basa en determinar el porcentaje de trazador que ha salido del sistema a distintos tiempos (*Ec05*), lo que representa la fracción de agua nueva (una vez que se dejó de inyectar el trazador) que se ha mezclado con el agua que estaba antes de inducir el pulso negativo [30].

$$F_i(t) = \frac{[C]_o - [C]_i}{[C]_o - [C]_{base}} \dots\dots\dots(Ec05)$$

Donde C_o representa la concentración del trazador en la fuente justo antes de detener su adicción instantánea, es decir, en el tiempo = 0 (pulso negativo), C_i sería la concentración del trazador en el punto de muestreo en el tiempo i , y C_{base} representa la concentración del trazador presente en el agua cuando no se ha hecho ninguna adicción del trazador (por ejemplo, en el caso de usar cloruro de sodio como trazador, existe la posibilidad que el agua tenga el ión cloruro en su composición). En ese sentido, el denominador representa la cantidad de trazador que se adicionó y el numerador la cantidad que ha salido a partir que se detiene la adicción del trazador. Al estar dividiendo, representa un porcentaje como se comentó anteriormente. Al graficar esta expresión, se obtiene una curva que se incrementa de 0 a 1 y el área sobre la curva representa el tiempo medio de residencia (TMR). Con el fin de simplificar el cálculo esta área se determina mediante la *Ec06*:

$$TMR = \int_0^1 t dF(t) \approx \sum_0^n t_i \cdot F_i(t) \dots\dots\dots(Ec06)$$

Lawler [31] propone un método de cálculo en que a partir de la normalización de la concentración del punto de muestreo respecto a la concentración de entrada determina la distribución interna de los tiempos de residencia $W(t)$. esta función representa la fracción del trazador que en

tiempo t no han salido del sistema ($Ec07$), contrario a la función $F(t)$. Al graficar esta función, se obtiene una curva que decrece de cero a uno dado que se trata de un pulso negativo [31].

$$W_i(t) = \frac{C_i}{C_0} = \frac{C_i - C_{base}}{C_0 - C_{base}} \dots\dots\dots(Ec07)$$

Cuadro 2. Modelos estadísticos de predicción para formación de THMs reportados en la literatura

Id	Modelo de predicción	Referencia
1	$[TTHM] = 0,00082(pH-2,8)(TOC)(D)^{0,25}(t)^{0,36}$	[22]
2	$[TTHM] = -3,91 + (Br^-)^{0,15} + 0,23 \left(\log(Cl_2) + 0,24(pH) + 10^{(0,0097)} + 0,26(NVTOC) \right)$	[1]
3	$[THM] = 0,0031(UV_{254} \cdot [DOC])^{0,44}[Cl_2]_0^{0,409}t^{0,265}T^{1,06}(pH-2,6)^{0,715}([Br] + 1)^{0,0358}$	[25]
4	$[TTHM] = 0,00309([DOC](DUV-254))^{0,440}(Cl_2)^{0,409}t^{0,265}T^{1,06}(pH-2,6)^{0,715}(Br + 1)^{0,036}$	[22]
5	$[THM] = 7,1(UV_{254})^{0,5}[DOC]^{0,004}([Cl_2]-7,6[NH_3])^{0,224}t^{0,23}T^{0,48}(pH-2,6)^{0,72}([Br] + 1)^{2,01}$	[22]
6	$[THM] = 14,6[(UV_{254})^{0,849}[Cl_2]^{0,206}t^{0,306}(pH-3,8)^{1,01}]$	[22]
7	$[TTHM] = 12,7 (TOC)^{0,291}(T)^{0,271}(D)^{-0,072}$	[1]
8	$[TTHM] = 0,00412(DOC)^{0,152}(Br)^{0,068}T^{0,61}pH^{1,6}(t)^{0,260}$	[1]
9	$[TTHM] = 23,9[(TOC)(UVA)]^{0,403}(Cl_2)^{0,225}(Br)^{0,141}1,027T^{-20}1,156(pH-7,5)t^{0,264}$	[22]
10	$[TTHM] = a[OH^-]^j([Cl]_2(1 - e^{-kt})^m)(UV_{254})^n(algae)^p$	[22]
11	$[TTHM] = 1,392(DOC)^{1,092}(pH)^{0,531}(T)^{0,255}$	[1]
12	$[TTHM] = 0,044(DOC)^{1,030}(t)^{0,262}(pH)^{1,149}(D)^{0,277}(T)^{0,968}$	[1]
13	$[TTHM] = Q \cdot t^{0,156}C_0^{0,147}TOC^{0,187} \cdot x^{0,206}(pH-2,6)^{0,260}$	[20]
14	$[TTHM] = 16,9 + 16(TOC) + 3,319(Cl_2)-1,1135(T) + 1,139(t)$	[16]
15	$[TTHM] = 0,0707(TOC + 3,2)^{1,314}(pH-4,0)^{1,496}(C_0-2,5)^{-0,197} (+ 10)^{0,724}$	[17]
16	$[TTHM] = 10^{-1,375}t^{0,258}(C_0/DOC)^{0,194}pH^{1,695}T^{0,507}Br^{0,218}$	[15]
17	$[TTHM] = 2,056 + 1648,2 \cdot UV_{254}$	[15]
18	$[TTHM] = -9,22 + 360,97(UV) + 0,54(T) + 0,12(t)$	[21]
19	$[\sqrt{TTHM}] = -28,8 + 1,6 \cdot TOC + 2,7 \ln(\sigma)-1,3 \ln(Bc) + 2,4pH + 3,7Cl + 0.1 T_w$	[29]
20	$[THM] = 0,02 (pH)^{2,279} (T)^{0,368}(T_w)^{9,499 \times 10^{-2}}$	[28]

A partir de esta función se determina la distribución de tiempos de residencia a la salida $E(t)$, derivando la función W con respecto al tiempo (Ec08).

$$E(t)_i = -\frac{dW(t)}{dt} \approx -\left(\frac{W(t)}{t}\right) = \frac{W_i - W_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \dots\dots\dots(Ec08)$$

Finalmente, se determina el tiempo medio de residencia utilizando la siguiente expresión (ver Ec09):

$$TMR = \frac{\sum_{i=0}^n t_{i,prom} \cdot E(t)_{i,prom} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=0}^n E(t)_{i,prom} \cdot \Delta t_i} \dots\dots\dots(Ec09)$$

En donde el sufijo “*prom*” se refiere al promedio entre dos mediciones consecutivas para cada intervalo de tiempo.

Ejemplo de ensayo de trazadores

Se realizó un ensayo de trazadores en una red de distribución a escala de laboratorio, compuesta por tuberías de PVC de 12,5 mm de diámetro. La red está compuesta de cuatro líneas principales en la cual, a través de válvulas de control, se simulan configuraciones de tuberías en serie, paralelo, ramificadas y en malla (figura 1). Específicamente, se aplicó una dosificación de cloruro de sodio de manera constante mediante pulso negativo a la entrada del sistema. Para ello, se utilizó una bomba peristáltica multicanal Masterflex L/S de 4 canales. La desaparición del trazador se midió en términos de conductividad eléctrica en dos puntos de control ubicados al final de la red. Se realizaron mediciones cada 30 segundos. Los resultados de la prueba se muestran en la figura 2.

Aplicando el método propuesto por DiGiano et. al. [30], se obtuvo la curva $F(t)$ utilizando la Ec(5) para luego determinar el tiempo medio de residencia en los puntos de control mediante la Ec(6). La curva F se muestra a continuación (figura 3):

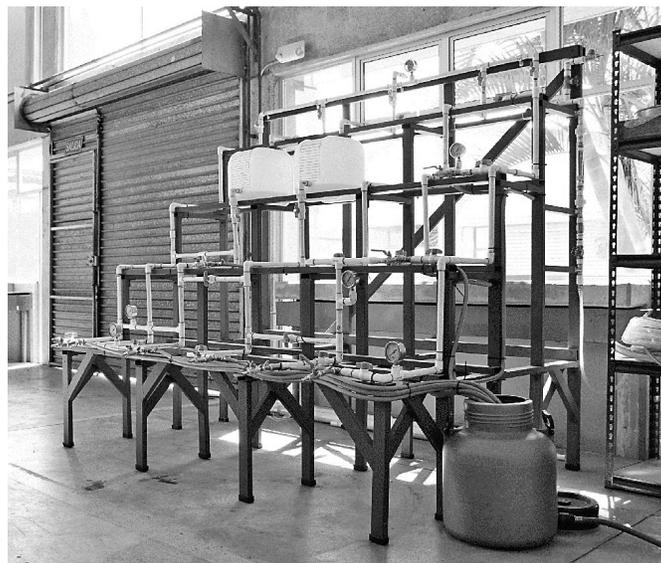


Figura 1. Red de distribución a escala de laboratorio para la realización del ensayo de trazadores mediante pulsos negativos.

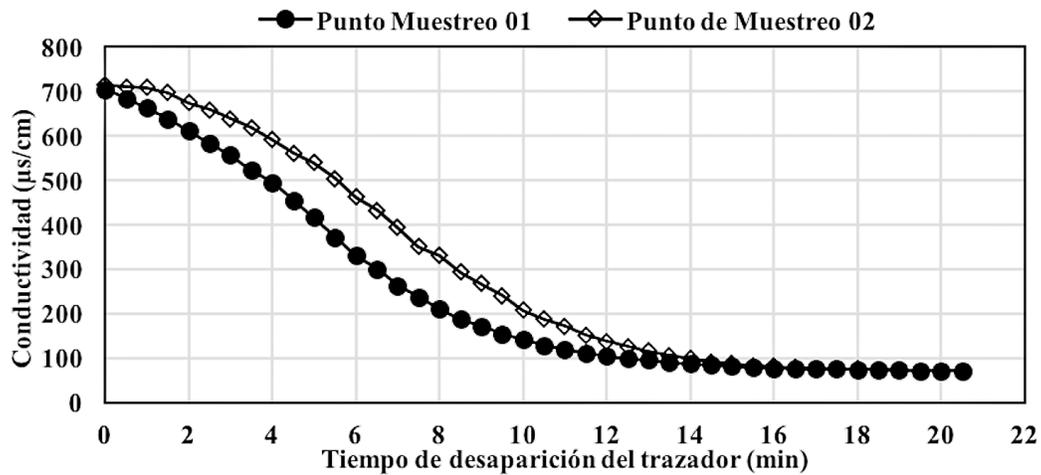


Figura 2. Valores de conductividad respecto al tiempo en el ensayo de pulso negativo.

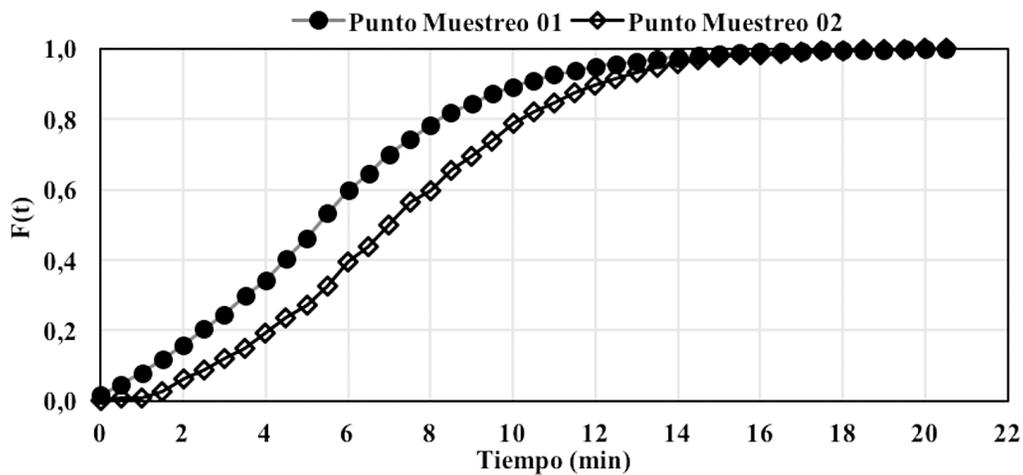


Figura 3. Curva F(t) del trazador para los puntos de control de la red a escala piloto.

Aplicando el método descrito por Lawler [31] se obtuvo la curva $W(t)$ mediante la Ec(7) (figura 4). A partir de estos datos y mediante la Ec(8) y Ec(9) se determinó el tiempo medio de residencia de los puntos de control.

Finalmente, en el cuadro 3, se muestra una comparación de los valores obtenidos del tiempo medio de residencia según los métodos de cálculo acá discutidos. Se puede observar que ambos métodos son precisos y de fácil comprensión. En ese sentido, el ensayo de trazadores no solo permite determinar de manera practica el tiempo medio de residencia, sino que además, la información suministrada por la curva $F(t)$ y $W(t)$ relacionada con la distribución de los tiempo de residencia en los puntos de control, provee mayor información respecto a los distintos tiempo de reacción y su probabilidad de ocurrencia en un periodo de análisis dado, facilitando la valoración y la gestión del riesgo asociado con la formación de THMs en las redes de distribución.

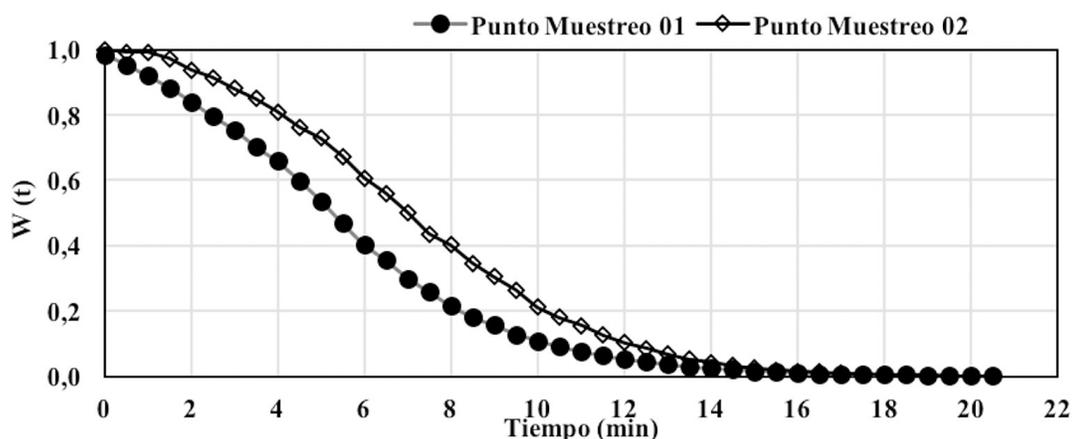


Figura 4. Curva $W(t)$ del trazador para los puntos de control de la red a escala piloto.

Cuadro 3. Comparación de los tiempos medios de residencia obtenidos mediante el ensayo de trazadores de en la red de distribución a escala piloto.

Id	TMR (min)*		Porcentaje de diferencia (%)
	Método 01 [30]	Método 02 [31]	
Punto Muestreo 1	5,82	5,68	2,40%
Punto Muestreo 2	7,54	7,30	3,31%

Conclusiones

El desarrollo de modelos de predicción de THMs constituye una herramienta muy valiosa en el marco del desarrollo de las estrategias de control para la mitigación del riesgo de formación de THMs en redes de distribución de agua. Evidentemente, su uso se ve limitado por ser muy específicos del lugar. Comparando la factibilidad y practicidad de uso, se concluye que los modelos estadísticos basados en regresiones multivariables pueden ser potencialmente utilizados en Costa Rica.

Desde el punto de vista de construcción y validación del modelo, indiscutiblemente, el mayor reto radica en determinar el tiempo de reacción que equivale al tiempo medio de residencia. A pesar de existe la posibilidad de emplear la modelación hidráulica con este fin, se evidenció la factibilidad de hacer este tipo de determinaciones de manera más práctica y sencilla mediante la aplicación del ensayo de trazadores, lo cual permite brindar una herramienta de control al operador del servicio de agua desde el punto de vista de la gestión del riesgo de formación de THMs a lo largo de la red de distribución.

Referencias

- [1] R. Sadiq and M. J. Rodriguez, "Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review.," *Sci. Total Environ.*, vol. 321, no. 1–3, pp. 21–46, Apr. 2004.
- [2] P. C. Singer, *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. Denver, CO: American Water Works Association, 1999.

- [3] S. Barret, S. Krasner, and G. Amy, "Natural Organic Matter and Disinfection By-Products, Copyright, Foreword," en *Natural Organic Matter and Disinfection By-Products*, vol. 761, American Chemical Society, 2000, pp. i-v.
- [4] R. Clark, *Modeling Water Quality in Distribution Systems*, Second Edi. American Water Works Association, 2012.
- [5] G.-S. Wang, Y.-C. Deng, and T.-F. Lin, "Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water.," *Sci. Total Environ.*, vol. 387, no. 1-3, pp. 86-95, Nov. 2007.
- [6] K. E. Lansey and P. F. Boulous, *Comprehensive Handbook on Water Quality Analysis for Distribution Systems*. Pasadena, California: MWH Soft, 2005.
- [7] P. Roccaro, F. G. A. Vagliasindi, and G. V Korshin, "Relationships between trihalomethanes, haloacetic acids, and haloacetonitriles formed by the chlorination of raw, treated, and fractionated surface waters.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2014.
- [8] R. Fabris, K. Braun, J. Morran, L. Ho, D. Cook, and M. Drikas, "Relating water quality monitoring to disinfection by-product formation in four pilot treatment streams.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 62, no. 6, pp. 377-384, Sep. 2013.
- [9] B. B. Mamba, R. W. Krause, B. Matsebula, and J. Haarhoff, "Monitoring natural organic matter and disinfection by-products at different stages in two South African water treatment plants.," *Water SA*, vol. 35, no. 1, pp. 121-127, Jan. 2009.
- [10] M. Yan, D. Wang, J. Qu, J. Ni, and C. W. K. Chow, "Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: the third way through coagulant optimization.," *Water Res.*, vol. 42, no. 8-9, pp. 2278-86, Apr. 2008.
- [11] H.-C. Kim and M.-J. Yu, "Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control.," *Water Res.*, vol. 39, no. 19, pp. 4779-89, Nov. 2005.
- [12] S. Dharman, V. Chandramouli, and S. Lingireddy, "Predicting Total Organic Carbon Removal Efficiency and Coagulation Dosage Using Artificial Neural Networks.," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 743-750, Aug. 2012.
- [13] J. Ahn, S. Lee, K. Choi, and J. Koo, "Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system," *Sustain. Environ. Res.*, vol. Vol. 22, no. Issue 1, pp. p31-38, 2012.
- [14] E. C. Wert, J. Bolding, D. J. Rexing, and R. E. Zegers, "Real-time modeling of trihalomethane formation in a full-scale distribution system.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 61, no. 6, pp. 352-363, Sep. 2012.
- [15] D. Brown, J. Bridgeman, and J. West, "Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems," *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 79-99, 2011.
- [16] E. Idornigie, M. R. Templeton, C. Maksimovic, and S. Sharifan, "The impact of variable hydraulic operation of water distribution networks on disinfection by-product concentrations.," *Urban Water J.*, vol. 7, no. 5, pp. 301-307, Oct. 2010.
- [17] D. Brown, "The management of trihalomethanes in water supply systems," University of Birmingham, 2009.
- [18] L. D. Sánchez, S. Rodríguez, and P. Torres, "Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en el sector piloto Nápoles Ciudad Jardín del sistema de distribución de Cali," *Ing. y Compet.*, vol. Vol12, no. Issue1, p. 127-138p, 2010.
- [19] B. Carrico and P. C. Singer, "Impact of Booster Chlorination on Chlorine Decay and THM Production: Simulated Analysis.," *J. Environ. Eng.*, vol. 135, no. 10, pp. 928-935, Oct. 2009.
- [20] B. J. Courtis, J. R. West, and J. Bridgeman, "Chlorine demand-based predictive modeling of THM formation in water distribution networks.," *Urban Water J.*, vol. 6, no. 6, pp. 407-415, Dec. 2009.
- [21] L. Semerjian, J. Dennis, and G. Ayoub, "Modeling the formation of trihalomethanes in drinking waters of Lebanon," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 149, no. 1-4, pp. 429-436, 2009.
- [22] G. Korshin, M. Benjamin, and H.-S. Chang, "Modeling DBP Formation Kinetics: Mechanistic and Spectroscopic Approaches," 2004.
- [23] IRIS, "Integrated Risk Information System. Online database.," Washington D.C. US Environmental Protection Agency, 2014.
- [24] A. Grünwald, B. Št'astný, K. Slavičková, and M. Slaviček, "Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality," *Acta Polytech.*, vol. 41, no. 3, 2001.
- [25] G. L. Amy, P. A. Chadik, and Z. K. Chowdhury, "Developing Models for Predicting Trihalomethane Formation Potential and Kinetics," *Res. Technol.*, vol. 79, no. 7, pp. 89-97, 1987.

- [26] R. Clark and M. Sivaganesan, "Predicting Chlorine Residuals and Formation of TTHMs in Drinking Water," *J. Environ. Eng.*, vol. 124, no. 12, pp. 1203–1210, Dec. 1998.
- [27] C. Di Cristo, G. Esposito, and A. Leopardi, "Modelling trihalomethanes formation in water supply systems," *Environ. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 61–70, 2013.
- [28] M. E. Basiouny, T. A. Elmitwalli, and M. R. Ghazy, "Modeling of Trihalometanes in Benha Water Supply Network, Egypt," in *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008*, 2008, pp. 1–13.
- [29] A. Rivadeneyra, M. J. García, F. Delgado, A. González, F. Osorio, and O. Rabaza, "Feasibility Study of a Simple and Low-Cost Device for Monitoring Trihalomethanes Presence in Water Supply Systems Based on Statistical Models," *Water*, vol. 6, pp. 3590–3602, 2014.
- [30] F. A. DiGiano, W. Zhang, and A. Travaglia, "Calculation of the mean residence time in distribution systems from tracer studies and models," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–14, 2005.
- [31] D. F. Lawler, "Hydraulic characteristics of water treatment reactors and their effects on treatment efficiency," en *Water Quality and Treatment. A handbook on Drinking Water*, Sixth Edit., J. k. Edzwald, Ed. Denver, Colorado 80235: American Water Works Association, 2011.

Rentabilidad financiera en la renovación de siembras de café en Los Santos, Costa Rica*

Financial profitability in the renewal of coffee plantations, in Los Santos, Costa Rica

Carlos Díaz-Gutiérrez¹

Fecha de recepción: 17 de febrero de 2018
Fecha de aprobación: 25 de abril de 2018

Díaz-Gutiérrez, C. Rentabilidad financiera en la renovación de siembras de café en Los Santos, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 179-192.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4127>



* El presente artículo forma parte del proyecto de investigación "Propuesta Técnica y Económica, para generar perfiles de mercado, modelos de costos, avíos y análisis financiero de productos agropecuarios" desarrollado en el Centro de Investigaciones en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial de la Universidad de Costa Rica (CIEDA), 2015.

¹ Economista Agrícola. Director de la Maestría en Gerencia Agroempresarial, Universidad de Costa Rica, Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Campus Rodrigo Facio. San Pedro, Costa Rica. Correo electrónico: carlos.diaz@ucr.ac.cr

Palabras clave

Cultivos; flujo de efectivo; financiamiento; riesgo; intereses; rentabilidad.

Resumen

Un 35,2% del parque cafetalero costarricense se encuentra con una edad de la plantación de más de veinte años, lo que acarrea problemas de productividad y manejo; de ahí la importancia de efectuar el cambio de las plantaciones por medio de la renovación del cultivo. El estudio de la renovación se realizó considerando las condiciones de costos y producción de una hectárea de café establecida en la zona de Los Santos, Costa Rica, según datos brindados por productores líderes de la zona en el año 2015. Se ajustaron las condiciones del financiamiento requerido para la renovación a la capacidad productiva y de ingresos reflejado por el flujo de caja de la actividad. Se comparó el retorno de la renovación según el plazo de financiamiento bajo dos escenarios uno a diez años y otro a catorce, bajo condiciones de préstamo otorgados con fondos de Banca para el Desarrollo. Se obtuvo en el primer caso una respuesta negativa con un valor actual neto (VAN) de -¢ 126.539,94 y una TIR del 13,47%, mientras que para el escenario de plazo de financiamiento a 14 años el VAN fue de ¢ 691,50 y la TIR del 17,43%, siendo la tasa de rentabilidad mínima exigida (TREMA) de un 17,39%. Finalmente se desarrolló un análisis de riesgo probabilístico con base en la metodología de Monte Carlo.

Keywords

Crops; cashflow; financing; risk; interests; rentability.

Abstract

The 35,2% of the costarican coffee park is more than twenty years, which brings productivity and management issues, in this lays the importance of making the change in the crops through renewal of the harvests. The study of the renewal has been done taking into consideration the costs and production of one coffee hectare based on Los Santos, Costa Rica, according to the data the producers of the place gave in the year 2015. The conditions of financing that are required for the renewal to the productive performance and of the income are shown in the cashflow of the activity. The return of the renewal is compared by adjusting the term of the financing under two scenarios, one to ten years and another to fourteen, under loan conditions granted with funds from the "Banca para el Desarrollo". In the first case, a negative response was obtained with a NPV of -¢ 126.539,94 and an IRR of 13,47%, while for the 14-year financing term scenario, the NPV was ¢ 691,50 and a IRR of 17,43%, with the minimum required rate of return (Capital Cost) of 17,39%. Finally a probabilistic risk analysis is developed applying the Monte Carlo methodology.

Introducción

La renovación de siembras en las fincas cafetaleras constituye una práctica tecnológica relevante para el productor, con esta opción se logra cambiar una plantación cuya productividad es baja, por un material nuevo, para obtener niveles de rendimiento por unidad de superficie mayores.

Según Rendón [1] los cultivos envejecidos pueden ser afectados por problemas fitosanitarios que comprometen el desarrollo de las cosechas futuras, lo que hace necesario efectuar un plan de renovación para recuperar la capacidad productiva.

Sin embargo, este sistema también conlleva a desventajas para el agricultor, ya que elimina la producción de las plantas actuales, y el establecimiento de la renovación implica efectuar una inversión importante, lo que afecta el flujo de caja de la finca, principalmente en los años donde no hay cosecha o no se ha alcanzado un nivel estable en la productividad del cultivo renovado.

Para la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [2] en Costa Rica la producción de café presenta importancia como actividad económica, por ej. en el año 2014 el área sembrada de este grano fue de 93.774 ha, alcanzando en el 2015 el 8,5% del valor agregado en colones corrientes de las actividades primarias agropecuarias, en este mismo año el café generó un nivel de exportación para la economía nacional de U.S\$306.695.000, lo cual representa en términos relativos el 7% de las exportaciones del sector agropecuario, con precio promedio el quintal de café oro de U.S. \$205.

De acuerdo con el Plan Nacional de Renovación de Cafetales [3], de un total de 98.681 ha de café en producción, 34.754 (35,2%) presentaban edades de la plantación mayores a los veinte años, lo que demuestra una condición de envejecimiento en el parque cafetalero con las consecuencias en descensos en la productividad para el país. Según el informe brindado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería a los delegados al congreso cafetalero, el Programa Nacional de Renovación de Cafetales, al mes de setiembre del 2015, había girado un monto de ₡6.368. 637.603,48 para proyectos de este tipo, con un total de 2.403,01 ha con créditos aprobados para tal fin [4].

En Costa Rica según Ramírez [5], a partir de la cosecha 2000/2001 se ha venido presentando un marcado descenso en la producción de café, lo cual se ha mantenido en los últimos diez años, uno de los factores que incide según el especialista es la condición de contar con una proporción importante de plantaciones viejas, siendo necesario lograr procesos de renovación de estas áreas para alcanzar mayores niveles de productividad, por ej. mientras en la cosecha 1999/2000 el volumen de producción fue superior a los 3.5 millones de fanegas, en los últimos diez años el promedio de producción es de 2.1 millones.

La zona de Los Santos, Costa Rica, se ha caracterizado por su excelente taza, café reconocido como de alta calidad en los mercados internacionales; zona con una participación total en la cosecha cafetalera 2014-2015 de 153.512 ton de café fruta, lo que representa el 32,4% de la producción nacional, y con la de mayor participación en la producción del grano a nivel país, esto según datos de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [2].

Los recursos invertidos en la etapa de producción y mantenimiento del cultivo y en la conservación de los recursos en la finca, hace que el productor requiera lograr un retorno económico positivo que compense el pago de los recursos de la producción y que al mismo tiempo brinde un excedente monetario para cubrir sus necesidades, por lo cual es prioritario que el cultivo genere una relación beneficio/costo requerida.

El objetivo de este trabajo fue establecer un modelo capaz de cuantificar la rentabilidad y el riesgo financiero, al efectuarse la renovación de una ha de café, considerando la tecnología, costos de producción y las variables del crédito, utilizados en finca en la zona de Los Santos, Costa Rica.

Materiales y métodos

Fundamentos del modelo financiero para evaluar la renovación del cultivo

El ente interesado en los resultados del proyecto fue el Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD), instancia que requería contar con un instrumento de evaluación que permitiera medir la rentabilidad lograda por el productor de café y a su vez determinar los impactos de las variables

del financiamiento para la renovación del cultivo, ajustadas a los resultados del flujo de caja de esta actividad productiva.

Se valoraron los plazos de financiamiento para el productor, la tasa de interés de equilibrio que el cultivo renovado puede pagar con el fin de no generar pérdidas ni ganancias, y se establece los plazos de periodo de gracia requeridos para que el productor logre obtener una rentabilidad mínima con esta actividad.

En este trabajo se utilizó la información de los costos de la renovación agrupados en la categoría de mano de obra del cultivo, costos de fertilizantes y agroquímicos y otros costos (Cortés y Paniagua, comunicación personal). La estructura de las partidas y requerimientos en cantidades de recursos para implementar la renovación, fue validado en campo con la participación de productores líderes de la zona de Los Santos, con el fin de generar un modelo que identifique la realidad productiva de la actividad.

Los datos se proyectaron en un horizonte de evaluación de veinticinco años que a criterio de los propios caficultores abarca el ciclo de producción normal de una plantación de café en la zona, para ello se consideró la curva técnica de máxima productividad, momento en el cual debería someterse la finca a renovación.

Para estimar la proyección de las ganancias logradas en el ciclo del cultivo se utilizó la herramienta de flujo de efectivo proyectados en forma nominal, desarrollados mediante la hoja de cálculo Excel, y empleándose el indicador de valor actual neto (VAN) como determinante para definir la rentabilidad de la renovación de la plantación. Tanto en el método de la tasa interna de retorno como en el de valor presente neto, la rentabilidad debe ser igual o exceder al costo del capital para que el proyecto sea potencialmente aceptable según lo señala Block, *et al* [6], en este caso el VAN debe ser positivo para demostrar que las condiciones del financiamiento que se otorgarían para la renovación del cultivo genere un retorno económico positivo que compense a su vez el riesgo asumido con la sustitución de la plantación.

Los diferentes escenarios se establecieron bajo el esquema de financiamiento que el Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD) otorgaría para cubrir las necesidades del productor al efectuar la renovación de la plantación.

Se parametrizó el modelo financiero para obtener diferentes cambios en la rentabilidad al modificar variables de tipo productivo o de financiamiento, que indiquen la sensibilidad que producen esas variaciones en los resultados de retorno para el productor.

Identificado el plazo de financiamiento y el periodo de gracia ajustado a la capacidad de pago de la actividad, se realizó el cálculo de la tasa de interés de equilibrio, que consiste en encontrar la máxima tasa que debe recaer sobre el préstamo otorgado al productor para que el rendimiento económico sea de cero colones.

Finalmente se realizó un análisis de riesgo financiero con base en el método de análisis de simulación de Monte Carlo, donde se generan múltiples escenarios cambiando aleatoriamente la variable precio de venta de la fanega de café y la tasa de interés del financiamiento, generándose una distribución de probabilidad de la VAN, con el fin de establecer la posibilidad de pérdida del productor o de la obtención de un valor presente neto < 0 .

Para Sapag [7] la simulación de Monte Carlo permite estimar los valores esperados para distintas variables no controlables, por medio de una selección aleatoria en la cual la probabilidad de escoger entre todos los resultados posibles está en estricta relación con sus respectivas distribuciones de probabilidad, esta técnica se realizó por medio del programa computacional Crystal-Ball®.

Supuestos en los que se basa el modelo financiero para la renovación del cultivo

Para la valoración de la rentabilidad del sistema se consideró un área de producción de una ha renovada de café, según los estándares de producción utilizados en la región de Los Santos, Costa Rica.

Las variables de plazo, tasa de interés, periodo de gracia y monto de financiamiento dentro del modelo de evaluación se ajustaron a las condiciones productivas y de flujo de caja que genera la actividad, es decir, se ajustó el crédito a las condiciones del cultivo y no viceversa.

Hay que considerar según Arcila *et al* [8] que el cafeto es un arbusto perenne cuyo ciclo de vida en condiciones comerciales alcanza hasta 20-25 años, dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo, así se consideró la proyección del modelo financiero a un plazo u horizonte de evaluación de veinticinco años.

Para obtener los indicadores de rentabilidad y los impactos del apalancamiento bancario se empleó el instrumento del flujo de caja con financiamiento o flujo del inversionista.

Los flujos de caja se expresaron en términos nominales con el empleo de una tasa de inflación esperada del 5% anual, aplicada tanto a los precios de liquidación por fanega y a los costos del modelo.

Los rendimientos estimados del cultivo una vez establecida la renovación fueron de 12, 20 y 25 fanegas por ha en los años 3, 4 y 5 y del año 6 al 20 se mantuvo en 30 fanegas por considerarse como la etapa estable de producción, a partir del año 21 al 25 la capacidad productiva de la planta disminuye por lo que se proyectó una merma del 5% anual, finalizando en el año 25 en una cantidad de 23 fanegas.

Los costos utilizados en el modelo se contrastaron en campo por medio de entrevistas estructuradas a productores referentes.

Los precios de venta del café utilizados correspondieron a precios de liquidación pagados al productor por las empresas beneficiadoras de la zona en las cosechas: 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012 y 2012/2013, para un total de 273 datos según información del Instituto del Café de Costa Rica [9]; para la renovación de café se aplicó el precio promedio de dicha serie, correspondiente a un monto de $\text{¢}91.138,15$ por fanega.

Es claro como lo indica Baca [10] que para aceptar un proyecto las ganancias deben ser mayores que los desembolsos, lo cual da por resultado que el VAN sea mayor a cero. Para definir la rentabilidad de la renovación del cultivo en los escenarios planteados se aplicó el indicador de Valor Actual Neto (VAN), con una tasa de rentabilidad mínima aceptada (TREMA) establecida en un 17,4%, esta tasa de rentabilidad mínima corresponde al retorno anual promedio del mercado accionario costarricense o costo de oportunidad del capital, según el índice accionario de la Bolsa Nacional de Valores del año 2013 al 2015 [11].

La tasa de interés empleada para el cobro del financiamiento al productor fue la tasa básica pasiva (TBP), prevaleciente al momento de efectuar la evaluación de la actividad de renovación, en forma adicional los modelos de producción se sometieron a una tasa de interés de equilibrio generada por medio de la hoja de cálculo de Excel, tasa máxima a ser pagada por el caficultor por el préstamo que permite generar un VAN igual a cero colones.

Las variables empleadas para generar la simulación Monte Carlo en la evaluación del riesgo aleatorio fueron el precio de venta por fanega de café y la tasa de interés del préstamo bancario, dando diferentes resultados de VAN y se acumularon esos resultados en una distribución de probabilidad, con lo cual se obtuvo la probabilidad que tendría el productor de café de generar

una rentabilidad o VAN negativa al hacerse la renovación del cultivo. Para obtener la simulación de Monte Carlo se ha empleado el programa de cómputo Crystal-Ball®.

En la evaluación financiera del modelo se aplicó el impuesto de renta para personas físicas con actividades lucrativas, según la escala definida por la Dirección General de Tributación Directa del Ministerio de Hacienda para el periodo 2014-2015.

Resultados y discusión

Costos de la renovación y condiciones del financiamiento

En la conformación del modelo financiero, se utilizó la clasificación de costos en tres grandes rubros: mano de obra, fertilizantes y agroquímicos, y otros. Se financió con la banca el 100% de estos costos desde el establecimiento de la nueva plantación en finca (año 0) hasta el año dos donde el cultivo renovado no ha generado producción, luego en los años 3 y 4 se financió bancariamente el déficit entre los ingresos y egresos obtenidos, pues en estos dos años la productividad lograda con la renovación es de 12 y 20 fanegas por ha.

A partir del sexto año de operación, el productor inicia el pago tanto de intereses como amortización del principal del préstamo, pues la finca renovada alcanza en ese año la máxima productividad del cultivo (30 fanegas/ha), condición identificada por el Sistema de Banca para el Desarrollo para iniciar el pago del préstamo otorgado. Durante los primeros cinco años se estableció un periodo de gracia completo de intereses y de amortización al principal.

En el cuadro 1, se presentan los rubros de costos requeridos y montos a financiar en el establecimiento en los primeros cuatro años de operación del sistema productivo, cubiertos mediante fondos bancarios.

Cuadro 1. Costos operativos y financiamiento cubiertos al productor en el sistema de renovación de café por hectárea, zona de Los Santos, Costa Rica, 2015. Monto en colones nominales.

Costo	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Total
Mano de obra	310.852	227.376	338.863	772.551	1.209.036	2.858.680
Fertilizantes y agroquímicos	1.284.127	479.054	569.253	519.686	545.671	3.397.793
Otros costos	385.000	108.821	547.043	612.168	677.255	2.330.289
Total costos operativos	1.979.979	815.252	1.455.160	1.904.407	2.431.963	8.586.763
Monto a financiar	1.979.979	815.252	1.455.160	638.361*	216.383*	5.105.138

* Se financia el déficit entre los ingresos menos costos debido a la baja productividad del cultivo en ambos años.

Fuente: elaboración propia con base a datos brindados por los productores de la zona.

En la figura 1 se detalla la distribución relativa de los costos usados en la renovación de una ha de café en la zona de Los Santos, Costa Rica, es el rubro de agroquímicos y fertilizantes el que consume el mayor monto del presupuesto para la renovación del cultivo, con un 40% del valor total.

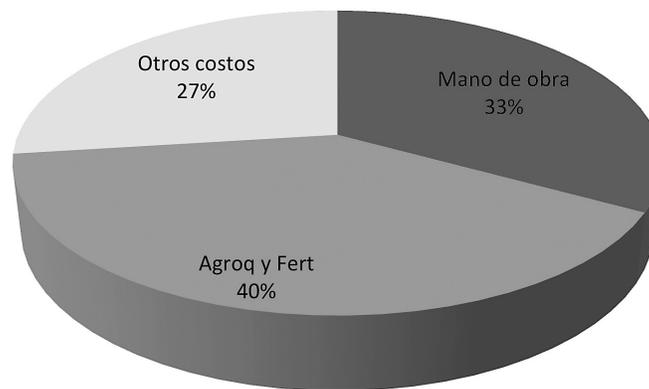


Figura 1. Distribución relativa rubros de costos de operación en la renovación de una ha de café. Zona de Los Santos, Costa Rica, 2015. Fuente: elaboración propia, con base a datos del cuadro 1.

Escenarios de rentabilidad planteados

Se construyeron dos escenarios financieros, el primero donde se ajustó el plazo del financiamiento del crédito otorgada al productor a diez años, iniciando el pago tanto de intereses como amortización del principal del año 6 al 15, luego se evaluó un segundo modelo ampliándose el plazo para el pago del préstamo a un total de catorce años, iniciándose en el sexto año y finalizando en el año 19.

En el cuadro 2, se demuestra como al aplicarse en el proceso de renovación del cultivo un plazo de financiamiento de diez años, con una tasa de interés del 6,90%, la rentabilidad lograda fue de un VAN negativo de - $\text{¢}126.539,94$ y una TIR del 13,47% (menor a la TREMA), así bajo las condiciones de financiamiento y cobertura de los costos expuestos, no se genera rentabilidad al efectuarse la renovación del cultivo.

Al ampliarse el plazo del financiamiento se logra en la renovación de la plantación un VAN de $\text{¢}691,50$ y una TIR del 17,43%, valores que están muy cercanos al equilibrio financiero, pues el VAN es cercano a $\text{¢}0$ y la TIR cercana a la tasa TREMA del 17,39% (cuadro 3). Así, bajo las condiciones de precios de venta, costos, y productividad del modelo, no se puede dar un plazo de financiamiento al productor menor a los catorce años para el pago del préstamo y una tasa de interés mayor al 6,90% anual.

Análisis de sensibilidad de la VAN

La sensibilidad del VAN del modelo de renovación se efectuó realizando cambios en dos variables relevantes que afectan la rentabilidad de la producción: el precio de venta por fanega y la tasa de interés anual del préstamo. Al realizar las variaciones, el precio inició en un monto de $\text{¢}90.000$ por fanega y alcanzó los $\text{¢}100.000$ por fanega, mientras que la tasa de interés a ser cobrada por el financiamiento se movió en la sensibilidad de un valor mínimo del 5% anual a un máximo del 8% anual (cuadro 4).

Por ej. cuando la fanega se vende en un precio de $\text{¢}91.138$ y se cobra una tasa de interés del 6,90% anual, el VAN es de $\text{¢}691,57$, valor ya comentado en el planteamiento del escenario base mostrado en el cuadro 3.

Como ilustración, se puede analizar como al disminuir el precio por fanega a $\text{¢}90.000$ y mantener la tasa de interés en el 6,90% anual el VAN disminuye a un monto de $-\text{¢}173.689,61$, demostrando el efecto desventajoso de esta combinación para el sistema de producción.

Por otra parte, si el precio por fanega se mantuviera en el valor original de $\text{¢}91.138$ pero la tasa de interés disminuyera a un 5% anual, el VAN aumentaría a un valor del $\text{¢}158.926,14$, siendo este un escenario ventajoso para el productor al aumentar la rentabilidad.

Es importante resaltar la alta sensibilidad de la variable precio de venta por fanega, pues con solo cambiar el precio de un valor de $\text{¢}91.138$ a $\text{¢}91.000$, el VAN cae de $\text{¢}691,57$ a un monto de $-\text{¢}20.475,02$, generando una disminución más que proporcional en el VAN con respecto a la variable de precio de venta.

Análisis del riesgo financiero al efectuarse la renovación del cultivo

Se realizó el análisis de riesgo por medio de la técnica de Monte Carlo, comprendiendo por riesgo, la probabilidad que presenta el sistema de producción de generar un VAN menor a $\text{¢}0$, es decir se muestra al productor la posibilidad de obtener una condición de pérdida con la implementación del sistema de cambio en el cultivo.

Para establecer el riesgo financiero, se consideraron como variables definitorias en los valores del VAN, el precio de venta por fanega y la tasa de interés anual del préstamo (variables supuesto).

Se utilizó un total de 273 valores de precios de liquidación correspondientes a los diferentes beneficiadores de la zona de Los Santos para las cosechas 2009/2010 hasta la cosecha 2013/2014. El programa de cómputo Crystal-Ball® efectuó con dichos datos el mejor ajuste en la variable precios, correspondiendo a una distribución de probabilidad logística, con un valor en la prueba Anderson-Darling del 0,6565.

En relación a la variable de tasa de interés se definió una distribución de probabilidad de tipo uniforme con un valor mínimo del 5% y máximo del 8% anual.

Al correr el modelo financiero se obtuvo una distribución acumulada de probabilidad del VAN ajustado a un comportamiento logístico, con un total de 10.000 interacciones o escenarios evaluados, (figura 2).

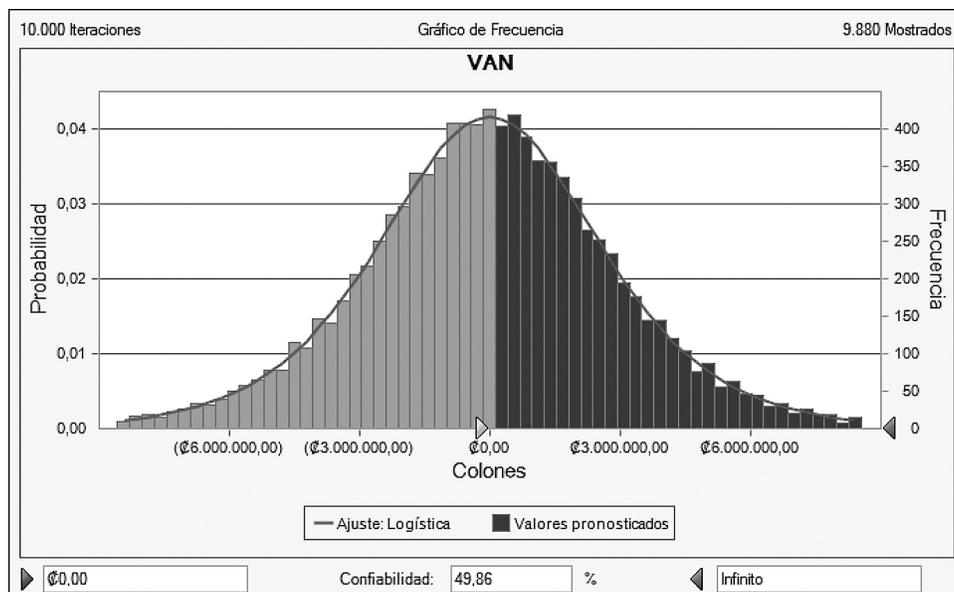


Figura 2. Análisis de riesgo en el modelo de renovación de café. Distribución de Probabilidad de la VAN, Costa Rica, 2015. Fuente: el autor, con base a programa de riesgo crystal-Ball.

Cuadro 2. Modelo de flujo de caja nominal con financiamiento a diez años plazo, para un sistema de renovación de café por hectárea, en la zona de Los Santos, Costa Rica. 2015.

Rubro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Rendimiento en fanegas		0	0	12	20	25	30	30	30	30	30	30	30
Precio/fanega		95.695	100.480	105.504	110.779	116.318	122.134	128.241	134.653	141.385	148.454	155.877	163.671
Total de ingresos		0	0	1.266.046	2.215.580	2.907.949	3.664.015	3.847.216	4.039.577	4.241.556	4.453.633	4.676.315	4.910.131
Costo mano de obra cultivo	-310.852	-227.376	-338.864	-772.552	-1.209.037	-1.532.254	-1.809.881	-1.915.119	-1.995.394	-2.095.163	-2.216.989	-2.309.917	-2.425.413
Costo de fertilizantes y agroquímicos	-1.284.128	-479.055	-569.254	-519.687	-545.671	-572.955	-601.602	-631.683	-663.267	-696.430	-731.252	-767.814	-806.205
Otros costos	-385.000	-108.822	-547.043	-612.169	-677.256	-733.829	-790.622	-830.890	-871.661	-915.244	-961.859	-1.009.056	-1.059.509
Total costos operativos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-1.904.407	-2.431.964	-2.839.038	-3.202.105	-3.377.691	-3.550.321	-3.706.837	-3.910.100	-4.086.788	-4.291.127
Utilidad antes de intereses e impuestos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	461.910	469.524	509.256	534.719	543.533	589.527	619.004
Pago de intereses del préstamo							-352.255	-317.029	-281.804	-246.578	-211.353	-176.127	-140.902
Utilidad antes de impuesto renta	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	109.655	152.495	227.452	288.140	332.181	413.400	478.102
Impuesto de renta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de pago de impuestos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	109.655	152.495	227.452	288.140	332.181	413.400	478.102
Préstamo bancario	1.979.980	815.252	1.455.161	638.362	216.384								
Amortización del préstamo							-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514
Flujo neto de efectivo	0	0	0	0	0	68.911	-400.858	-358.018	-283.062	-222.373	-178.333	-97.114	-32.412

Tasa de rendimiento mínima aceptada anual = 17,39% VAN= - ¢ 126.539,94 TIR= 13,47%

Continúa...



Continuación

Rubro	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
Rendimiento en fanegas	30	30	30	30	30	30	30	30	29	27	26	24	23
Precio/fanega	171.855	180.447	189.470	198.943	208.890	219.335	230.302	241.817	253.907	266.603	279.933	293.930	308.626
Total de ingresos	5.155.637	5.413.419	5.684.090	5.968.295	6.266.709	6.580.045	6.909.047	7.254.499	7.236.363	7.218.272	7.200.226	7.182.226	7.164.270
Costo mano de obra cultivo	-2.566.442	-2.674.018	-2.807.719	-2.970.978	-3.095.510	-3.250.286	-3.439.278	-3.583.440	-3.637.244	-3.724.702	-3.752.975	-3.815.812	-3.917.129
Costo de fertilizantes y agroquímicos	-846.515	-888.841	-933.283	-979.947	-1.028.944	-1.080.392	-1.134.411	-1.191.132	-1.250.688	-1.313.223	-1.378.884	-1.447.828	-1.520.219
Otros costos	-1.113.472	-1.168.109	-1.226.514	-1.288.984	-1.352.232	-1.419.843	-1.492.160	-1.565.377	-1.637.378	-1.714.527	-1.792.355	-1.875.732	-1.965.045
Total costos operativos	-4.526.430	-4.730.968	-4.967.516	-5.239.908	-5.476.686	-5.750.521	-6.065.849	-6.339.949	-6.525.310	-6.752.452	-6.924.213	-7.139.372	-7.402.393
Utilidad antes de intereses e impuestos	629.208	682.451	716.574	728.387	790.023	829.524	843.198	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Pago de intereses del préstamo	-105.676	-70.451	-35.225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad antes de impuesto renta	523.531	612.000	681.349	728.387	790.023	829.524	843.198	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Impuesto de renta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de pago de impuestos	523.531	612.000	681.349	728.387	790.023	829.524	843.198	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Préstamo bancario													
Amortización del préstamo	-510.514	-510.514	-510.514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo neto de efectivo	13.017	101.487	170.835	728.387	790.023	829.524	843.198	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123

Fuente: el autor.

Cuadro 3. Modelo de flujo de caja nominal con financiamiento a catorce años plazo, en un sistema de renovación de café por hectárea, zona de Los Santos, Costa Rica, 2015.

Rubro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Rendimiento en fanegas		0	0	12	20	25	30	30	30	30	30	30	30
Precio/fanega		95.695	100.480	105.504	110.779	116.318	122.134	128.241	134.653	141.385	148.454	155.877	163.671
Total de ingresos		0	0	1.266.046	2.215.580	2.907.949	3.664.015	3.847.216	4.039.577	4.241.556	4.453.633	4.676.315	4.910.131
Costo mano de obra cultivo	-310.852	-227.376	-338.864	-772.552	-1.209.037	-1.532.254	-1.809.881	-1.915.119	-1.995.394	-2.095.163	-2.216.989	-2.309.917	-2.425.413
Costo de fertilizantes y agroquímicos	-1.284.128	-479.055	-569.254	-519.687	-545.671	-572.955	-601.602	-631.683	-663.267	-696.430	-731.252	-767.814	-806.205
Otros costos	-385.000	-108.822	-547.043	-612.169	-677.256	-733.829	-790.622	-830.890	-871.661	-915.244	-961.859	-1.009.056	-1.059.509
Total costos operativos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-1.904.407	-2.431.964	-2.839.038	-3.202.105	-3.377.691	-3.530.321	-3.706.837	-3.910.100	-4.086.788	-4.291.127
Utilidad antes de intereses e impuestos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	461.910	469.524	509.256	534.719	543.533	589.527	619.004
Pago de intereses del préstamo							-352.255	-317.029	-281.804	-246.578	-211.353	-176.127	-140.902
Utilidad antes de impuesto renta	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	109.655	152.495	227.452	288.140	332.181	413.400	478.102
Impuesto de renta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de pago de impuestos	-1.979.980	-815.252	-1.455.161	-638.362	-216.384	68.911	109.655	152.495	227.452	288.140	332.181	413.400	478.102
Préstamo bancario	1.979.980	815.252	1.455.161	638.362	216.384								
Amortización del préstamo							-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514	-510.514
Flujo neto de efectivo	0	0	0	0	0	68.911	-400.858	-358.018	-283.062	-222.373	-178.333	-97.114	-32.412

Tasa de rendimiento mínima aceptada anual= 17,39% VAN= ¢ 691,57 TIR= 17,43%
 Continúa...



Continuación

Rubro	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
Rendimiento en fanegas	30	30	30	30	30	30	30	30	29	27	26	24	23
Precio/ fanega	171.855	180.447	189.470	198.943	208.890	219.335	230.302	241.817	253.907	266.603	279.933	293.930	308.626
Total de ingresos	5.155.637	5.413.419	5.684.090	5.968.295	6.266.709	6.580.045	6.909.047	7.254.499	7.236.363	7.218.272	7.200.226	7.182.226	7.164.270
Costo mano de obra cultivo	-2.566.442	-2.674.018	-2.807.719	-2.970.978	-3.095.510	-3.250.286	-3.439.278	-3.583.440	-3.637.244	-3.724.702	-3.752.975	-3.815.812	-3.917.129
Costo de fertilizantes y agroquímicos	-846.515	-888.841	-933.283	-979.947	-1.028.944	-1.080.392	-1.134.411	-1.191.132	-1.250.688	-1.313.223	-1.378.884	-1.447.828	-1.520.219
Otros costos	-1.113.472	-1.168.109	-1.226.514	-1.288.984	-1.352.232	-1.419.843	-1.492.160	-1.565.377	-1.637.378	-1.714.527	-1.792.355	-1.875.732	-1.965.045
Total costos operativos	-4.526.430	-4.730.968	-4.967.516	-5.239.908	-5.476.686	-5.750.521	-6.065.849	-6.339.949	-6.525.310	-6.752.452	-6.924.213	-7.139.372	-7.402.393
Utilidad antes de intereses e impuestos	629.208	682.451	716.574	728.387	790.023	829.524	843.198	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Pago de intereses del préstamo	-176.127	-150.966	-125.805	-100.644	-75.483	-50.322	-25.161	0	0	0	0	0	0
Utilidad antes de impuesto renta	453.080	531.485	590.769	627.742	714.540	779.202	818.037	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Impuesto de renta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de pago de impuestos	453.080	531.485	590.769	627.742	714.540	779.202	818.037	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123
Préstamo bancario													
Amortización del préstamo	-364.653	-364.653	-364.653	-364.653	-364.653	-364.653	-364.653	0	0	0	0		
Flujo neto de efectivo	88.428	166.832	226.116	263.090	349.887	414.549	453.385	914.550	711.053	465.820	276.013	42.854	-238.123

Fuente: el autor.

Cuadro 4. Sensibilidad del modelo de renovación de café según VAN en colones, con financiamiento a catorce años, con base en las variaciones en los precios de venta por fanega y en la tasa de interés del préstamo. Costa Rica, 2015.

CAMBIOS EN TASA DE INTERES							
CAMBIOS EN PRECIO DE LA FANEGA	¢691,57	5%	5,64%	6%	6,90%	7,20%	8%
	¢90.000	(14.084,39)	(67.846,15)	(98.087,14)	(173.689,61)	(198.890,43)	(266.092,62)
	¢91.000	137.945,95	84.583,10	54.566,49	(20.475,02)	(45.488,86)	(112.192,43)
	¢91.138	158.926,14	105.618,33	75.632,69	691,57	(24.319,45)	(90.954,21)
	¢92.000	289.976,30	237.012,34	207.220,12	132.739,56	107.912,70	41.707,76
	¢93.000	442.006,65	389.441,59	359.873,75	285.954,14	261.314,27	195.607,95
	¢95.000	746.067,34	694.300,09	665.181,01	592.383,31	568.117,41	503.408,34
	¢100.000	1.506.219,07	1.456.446,32	1.428.449,15	1.358.456,22	1.335.125,24	1.272.909,30

Fuente: autor

Al plantear un total de 10.000 escenarios variando aleatoriamente el precio de venta de la fanega de café y la tasa de interés cobrada por el financiamiento al productor, se obtuvo una probabilidad de un 50,14% de generar un VAN con valores negativos o pérdidas financieras, es decir, de cada cien escenarios posibles, cincuenta de ellos correspondieron a una posibilidad de perder para el caficultor (s 2).

Conclusiones

Al evaluarse el financiamiento para la renovación del cultivo, se demostró que al otorgarse al productor un plazo de diez años para cancelar el crédito, los indicadores de rentabilidad fueron negativos, con un VAN de -¢126.539,94 y una TIR del 13,47% que es menor a la tasa mínima requerida del 17,39%.

Al extender el plazo del financiamiento a un total de catorce años, con una tasa de interés el 6,90% anual y con un periodo de gracia de 5 años en el pago de intereses y principal, el productor logra alcanzar el equilibrio financiero al renovar la plantación de café, bajo estas condiciones el VAN se aproximó a un valor de ¢0 y la TIR fue similar a la tasa de rendimiento mínima requerida.

Al someter el productor de la zona, la finca a un proceso de renovación, el financiamiento debe darse bajo condiciones blandas con tasas de interés que no superen el 6,91% anual, con un periodo de gracia en principal e intereses no menores a los cinco años y con un plazo de pago de al menos catorce años.

El precio de liquidación de la cajuela de café, resultó ser sensible en la rentabilidad, al cambiar levemente esta variable se generó cambios fuertes en los indicadores financieros del modelo; se demostró que el precio de la cajuela no debe ser inferior a los ¢ 91.133,64 para sostener el sistema de renovación de la finca.

El análisis de riesgo aplicado al modelo de renovación del cultivo mediante la técnica de Monte Carlo, definió un alto nivel de riesgo financiero, con una probabilidad del 50,14% de obtener valores de rentabilidad menores a lo mínimo requerido.

Recomendaciones

Ante el efecto de la alta sensibilidad en el precio de liquidación del café, es importante que el productor se interese en la aplicación de tecnologías de alta productividad y que se mantenga la calidad del producto, con el fin de que se logren precios de liquidación diferenciados.

Es conveniente que los entes encargados de otorgar apoyo financiero al productor agrícola consideren las condiciones de productividad del cultivo, con el fin de ajustar el sistema de pago del préstamo a las necesidades del productor y no viceversa, como se demuestra en el presente trabajo.

Referencias

- [1] J. Rendon, "Sistemas de Renovación de Cafetales para Recuperar y Estabilizar la Producción". *Avances Técnicos*, No. 463. n/a, 2016.
- [2] Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. [2016]. "Boletín Estadístico Agropecuario", No. 26. [En línea]. Disponible en: www.infoagro.go.cr/BEA/BEA26/BEA26.pdf.
- [3] Instituto del Café de Costa Rica. [2010]. "Plan Nacional de Renovación de Cafetales. ICAFE, CRC. [En línea]. Disponible en: https://www.sintercafe.com/uploads/File/2010/jornadas_por_costa_rica/2.Plan_de_Renovacion_de_Cafetales_Sra_Ma_Eugenia_Montoya_Jefa_Unidad_de_Apoyo_al_Financiamient.pdf
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería. [2015]. "Informe al Congreso Cafetalero". MAG, San José, CRC. [En línea]. Disponible en: www.mag.go.cr/informacion/prog-nac-cafe-Informe-Congreso-Cafetalero-2015.pdf
- [5] J. Ramírez. [2017]. "Comunicaciones Técnicas de Café". No. 71. Ramírez Caficultura desde Costa Rica, Heredia, CRC. [En línea]. Disponible en: <http://www.ramirezcaficulturadesdecostarica.com/ct-71>
- [6] S. Block , G. Hirt y B. Danielsen, "Costo de Capital" en Fundamentos de Administración Financiera, Ed. McGraw-Hill, México D.F., 2013, pp. 289-321.
- [7] N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, "Análisis de Riesgo" en Preparación y Evaluación de Proyectos, Ed. McGraw-Hill, México D.F., 2014, pp. 299-314.
- [8] J. Arcila, *et al.* "Renovación y administración de los cafetales para estabilizar la producción de la finca" en Sistemas de Producción de Café en Colombia. Ed. Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia, 2007, pp. 145-160.
- [9] Instituto del Café de Costa Rica. [2015]. "Estadísticas y precios". ICAFE, CRC. [En línea]. Disponible en: <http://www.icafe.cr/sector-cafetalero/informacion-de-mercado/estadisticas-y-precios/>
- [10] G. Baca, "Métodos de Evaluación que toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo" en Evaluación de Proyectos, Ed. McGraw-Hill, México D.F., 2013, pp. 205-226.
- [11] Bolsa Nacional de Valores. [2015]. "Índice accionario". BNV, CRC. [En línea]. Disponible en: <https://www.bolsacr.com/agentes-puesto-bolsa/indices-bursatiles>

Mermelada enriquecida con fibra dietética de cáscara de Mango (*Mangifera indica* L.)

Marmalade enriched with dietary fiber from Mango (*Mangifera indica* L.) peel

Magaly Iuit-González¹, David Betancur-Ancona¹, Jorge Santos-Flores¹,
Carlos G. Cantón-Castillo^{1*}

Fecha de recepción: 26 de abril de 2018
Fecha de aprobación: 25 de junio de 2018

Iuit-González, M; Betancur-Ancona, D; Santos-Flores, J; G. Cantón-Castillo, C. Mermelada enriquecida con fibra dietética de cáscara de Mango (*Mangifera indica* L.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 193-201.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4128>



¹ Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería Química, Periférico Norte Kilómetro 33.5, Colonia Chuburná de Hidalgo Inn, C.P. 97203, Mérida, Yucatán.

* Autor de correspondencia: lgcanton@correo.uady.mx

Palabras clave

Mermelada; fibra dietética; cáscara de mango.

Resumen

Hoy en día es conocido por todos, la relación existente entre los alimentos consumidos por las personas y su estado de salud. Existen muchas enfermedades cuya aparición ha sido vinculada con la mala alimentación; debido a esto, hay una tendencia muy marcada a consumir productos saludables. Esta nueva tendencia presiona a diversos sectores de la industria de alimentos (cárnicos, lácteos, bebidas, etc.) para elaborar productos que no solamente sean buenos para la salud, sino que también puedan ofrecer un beneficio adicional a ésta. Este es el caso de los alimentos funcionales. En este trabajo se presenta la elaboración y evaluación de mermeladas adicionadas con un 20 y 30% de cáscara de mango (*Mangifera indica*, L.)(CM) comparándola con mermelada que no tenía adición de CM, se les realizó una evaluación sensorial. A la de mayor nivel de agrado, se le determinó la composición proximal y las fracciones de fibra dietética. La CM tuvo 14.4 % de fibra dietética total (FDT), 8.5 % de fibra dietética insoluble (FDI) y 5.9 % de fibra dietética soluble (FDS). La adicionada con un 30% de CM tuvo el mayor nivel de agrado (5.7) que la del 20% (5.6). El contenido de FDT en la mermelada con CM al 30 % (7.8 %) resultó mayor en comparación con la mermelada que no se le adicionó CM (5.5 %).

Keywords

Marmalade; dietary fiber; mango peel.

Abstract

Today, the relationship between the food consumed by people and their state of health is known by all. There are many diseases whose appearance has been linked to poor diet. Due to this, there is a very marked tendency to consume healthy products. This new trend puts pressure on various sectors of the food industry (meat, dairy, beverages, etc.) to produce products that are not only good for health but also offer an additional benefit to consumers. This is the case of functional foods. This paper presents the elaboration and evaluation of marmalades added with 20 and 30% of mango peel (*Mangifera indica*, L) (MP) comparing it with jam that had no addition of MP, they were made a sensory evaluation. The one with the highest level of pleasure was determined the proximal composition and the dietary fiber fractions. The CM had 14.4% total dietary fiber (TDF), 8.5% insoluble dietary fiber (IDF) and 5.9% soluble dietary fiber (SDF). The one added with 30% MP had the highest level of satisfaction (5.7) than the 20% (5.6). The content of TDF in the marmalade with MP at 30% (7.8%) was higher compared to the jam that was not added to MP (5.5%).

Introducción

Las tendencias mundiales de la alimentación en los últimos años indican un interés acentuado de los consumidores hacia ciertos alimentos, que además del valor nutritivo aporten beneficios a las funciones metabólicas y fisiológicas del organismo humano. Estas variaciones en los patrones de alimentación han generado una nueva área de desarrollo en la ciencia y tecnología de los alimentos y su relación con la nutrición que corresponde al nicho de los alimentos funcionales. Se han definido a los alimentos funcionales como “cualquier alimento o ingrediente alimenticio modificado, que pueda proporcionar un beneficio a la salud superior al de los

nutrientes tradicionales que contiene”. Estos alimentos han despertado el interés de diversos sectores y de la sociedad en general y resultan atractivos para las personas por su capacidad protectora contra la aparición de algunas enfermedades. De esta manera la dieta pudiera convertirse en instrumento de prevención de padecimientos futuros. Se han hecho diferentes estudios sobre gran variedad de alimentos funcionales y sus beneficios a la salud [1]. Uno de los elementos que puede formar parte de muchos alimentos funcionales es la fibra dietética.

La fibra dietética es la parte indigerible de los alimentos, que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado del ser humano sano, con una completa o parcial fermentación en el intestino grueso [2]. La fibra dietética es clasificada frecuentemente en Fibra Dietética Soluble (FDS) y Fibra Dietética Insoluble (FDI), de acuerdo a su comportamiento en medio acuoso. Mientras la fibra soluble forma una dispersión en agua, la considerada insoluble no lo hace. Como consecuencia de esa diferencia de hidratación, ambos tipos de fibras exhiben efectos fisiológicos distintos. La fibra dietética soluble incluye pectinas, hemicelulosas y gomas que por puentes de hidrógeno retienen 15 a 20 veces su peso en agua y producen una sensación de saciedad y heces blandas; estimulan la secreción gástrica; aceleran el movimiento del intestino delgado y acortan el tiempo de tránsito intestinal, con lo que se reduce la posibilidad de la absorción de colesterol, glucosa y triglicéridos por lo que la fibra dietética soluble es considerada un factor importante en la prevención de enfermedades cardiovasculares [3]. Tienen efecto prebiótico y las bacterias nativas del colon las fermentan y generan dióxido de carbono, hidrógeno, metano y ácidos grasos volátiles [2]. La fibra dietética insoluble constituida principalmente por la celulosa y la lignina; también se hidratan; forman el bolo; incrementan el volumen fecal; dan la sensación de saciedad; disminuyen el tránsito intestinal, y favorecen la evacuación. La cantidad recomendada de ingesta por día de fibra dietética para adultos es de 28 a 36 g [4].

Una fuente de fibra, que puede ser utilizada como materia prima para producir alimentos funcionales, es la cáscara de mango (CM). El Mango (*Mangifera indica*) es una fruta de consumo elevado en todo el mundo, con un mercado en crecimiento constante. La cadena de producción de mango mexicano es la segunda a nivel mundial con una participación del 20% del mercado global. Regionalmente, la mayor parte del mango consumido en los Estados Unidos (278.422 toneladas métricas) es importado de México, aproximadamente el 70% [5].

La vida de anaquel del mango, destinado a consumo como fruta fresca, es limitada y el uso de sistemas refrigerantes afecta parte de las características organolépticas deseadas. Lo anterior genera pérdidas sustanciales post cosecha, cuya consecuencia es la imposibilidad de aprovechar una cantidad masiva de fruta que no es aceptada para su comercialización como producto fresco, no obstante que la mayoría de sus características nutricias se conservan. En México, la industria de producción/comercialización de mango es fuertemente afectada por esta problemática. Industrialmente, el mango se utiliza para la preparación de concentrados, pulpas, néctares, mermeladas y jugos [6].

El aprovechamiento integral de las frutas es un requerimiento y a la vez una demanda que deben cumplir los países que desean implementar las denominadas “tecnologías limpias” o “tecnologías sin residuos” en la agroindustria. De tal modo que todas aquellas fracciones del fruto, tales como: cáscaras, semillas, corazones y los extremos o coronas, no resulten agravantes para el beneficio económico de las empresas y mucho menos para el medio ambiente pudiéndose derivar a productos principales o secundarios para la alimentación humana [7]. La cáscara de esta fruta es considerada un producto de desecho y constituye alrededor del 15 al 20 % con contenidos de compuestos valiosos como poli fenoles, carotenoides, enzimas y fibra dietética [8]. Dentro de los métodos de procesamiento para la conservación de alimentos,

la concentración implica evaporación del agua y una disminución de la actividad de agua como es el caso del proceso tecnológico de la elaboración de mermeladas, en donde también deben incluirse otros componentes indispensables para la conservación de la misma como pudieran ser, el uso de conservadores, pH ácidos, alta concentración de azúcar y desde luego, los tratamientos térmicos. Dentro de las características tecnológicas importantes del mango para su transformación en mermelada están su contenido de azúcares, pectinas, pigmentos, polifenoles, acidez, aroma, y otros componentes que juegan un papel muy importante dentro de las características propias de los frutos [9].

En este trabajo se estudió la elaboración de mermelada de mango (*Mangifera indica*, L) incorporada con cáscara como fuente adicional de fibra, para transformarlo en un alimento funcional y aprovechar la parte de la fruta que regularmente se deshecha. A los productos elaborados, se les evaluó el nivel de agrado y se determinó la composición proximal y las fracciones de fibra dietética de la mermelada que obtuvo el mayor nivel de aceptación sensorial.

Materiales y métodos

Obtención de la fuente de fibra

Se adquirieron frutos de mango (*Mangifera indica* L. var. Paraíso), en un supermercado de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Los mangos primeramente fueron lavados con agua y jabón, se procedió a lavar los frutos con agua limpia y se desinfectaron con agua clorada a una concentración de 0.05%. Se procedió al despulpado en un equipo marca Polinox, separando la cáscara y las semillas de la pulpa. Las cáscaras obtenidas se trocearon y se pusieron en agua en una relación de agua / cáscara de 2:1 (p/p) para posteriormente darles un tratamiento térmico a una temperatura de 100°C por un tiempo de 10 min. Se escurrieron y fueron molidas en un procesador de alimentos (Picalica, Moulinex). Por último, se almacenaron en refrigeración a 4°C, en un recipiente plástico cerrado herméticamente hasta su posterior análisis y utilización.

Composición proximal y fracciones de fibra.

A la materia prima usada como fuente de fibra, cáscara de mango, se le realizó el análisis proximal de acuerdo a las metodologías reportadas por AOAC [10]: humedad (método 925.09), proteína cruda (método 954.01), mediante el sistema Kjeldhal (Tecator, Sweden), empleando un factor de conversión de 6.25; fibra cruda (método 962.09) utilizando un sistema Fibertec (Tecator, Sweden); grasa cruda (método 960.39), la cual se cuantificó por medio de un sistema soxtec (Tecator, Sweden) después de la extracción por 1 h con hexano; cenizas (método 923.03) y extracto libre de nitrógeno (E. L. N.) que se cuantificó por diferencia sustrayendo al 100% los componentes anteriores.

Asimismo, se les determinó el contenido de fibra dietética total (FDT), fibra dietética soluble (FDS) y fibra dietética insoluble (FDI) de acuerdo a los métodos enzimáticos gravimétricos de Prosky et al [11]. Las fracciones de fibra dietética fueron aisladas después de la digestión enzimática de la proteína y almidón usando de manera secuencial α -amilasa termoestable (Sigma A-3306), proteasa (Sigma P-3910) y amiloglucosidasa (Sigma A-913). Los residuos insolubles se separaron por filtración y la fibra soluble se precipitó con etanol. Los residuos fueron secados y se les determinó el contenido de cenizas y proteína para hacer las correcciones respectivas. La FDI se determinó de forma similar a la FDT, omitiendo el paso de precipitación con etanol al 95 % a 60 °C. La FDS se obtuvo por diferencia entre la fibra dietética total y la fibra dietética insoluble.

Formulación de la mermelada

La elaboración del producto se realizó con base en una formulación base para obtener una mermelada. Para este estudio, las mermeladas se elaboraron sustituyendo parcialmente la cantidad de pulpa de fruta por cáscara de mango (CM) en niveles de incorporación de 20 y 30% en base seca. De manera adicional se preparó una mermelada control a la que no se le adicionó CM.

Cuadro 1. Formulación de las mermeladas con diferentes niveles de inclusión de fibra.

Ingredientes	Mermelada Control (g)	Mermelada con 20% de cáscara de mango (g)	Mermelada con 30% de cáscara de mango (g)
Pulpa licuada	490	392	343
Pulpa de mango	210	168	147
Cáscara	0	140	210
Azúcar	700	700	700
Pectina	7	7	7
Ácido Cítrico	1.00	1.25	1.75

Proceso de elaboración de la mermelada

Del proceso de despulpado, el 70% de la pulpa se licuó en un equipo Osterizer y el 30% se cortó en trozos pequeños de 1cm³. Se pesaron los ingredientes: fruta, cáscara, ácido cítrico, azúcar y pectina según requerimientos de proceso. Luego se procedió al mezclado de pulpa y cáscara en las proporciones indicadas en las formulaciones. Se adicionó el ácido cítrico (en solución acuosa al 50%) para ajustar el pH entre 3.3 y 3.5. Seguidamente, la mezcla se calentó se durante 10 min en una marmita semi industrial marca Groen, transcurrido este tiempo se le agregaron 2/3 partes del azúcar y se continuó con el calentamiento hasta alcanzar una lectura entre 55 y 58 °Brix. Se agregó el último tercio de azúcar, a la cual se le había incorporado previamente la pectina y se continuó el calentamiento hasta que la lectura en el refractómetro llegó a 65°Brix. Una vez que la mermelada alcanzó los sólidos solubles preestablecidos se procedió al envasado en caliente en frascos previamente esterilizados; una vez llenos los recipientes se cerraron completamente y se colocaron en posición invertida durante 15 min, transcurrido el tiempo se regresaron a su posición normal, se dejaron enfriar y se etiquetaron.

Evaluación sensorial

La prueba de nivel de agrado se realizó tomando como referencia la metodología descrita por Lutz et al [12]. Se dispuso de un panel de 99 jueces potencialmente consumidores (no entrenados), a los cuales se les pidió anticipadamente su aceptación a participar en esta prueba y se les explicó de antemano las características generales de la evaluación y la responsabilidad que en ella tenían como jueces. Para la evaluación fueron colocados en cabinas de prueba aisladas en donde expresaron su percepción con ayuda del instrumento evaluador. La edad de los jueces estuvo entre 18 y 55 años, siendo 52 mujeres y 47 hombres los que participaron en la prueba. El nivel de agrado o desagrado se estableció por medio de una escala hedónica estructurada con siete puntos descriptores: los tres puntos superiores indicaron agrado (“me gusta poco”, “me gusta” y “me gusta mucho”), el punto intermedio indicó indiferencia y los tres puntos inferiores señalaron desagrado por los productos (“me disgusta poco”, “me disgusta” y “me disgusta mucho”). En la prueba se evaluaron dos muestras cada una codificada con tres dígitos al azar y se proporcionó a los jueces agua para enjuagarse la boca entre muestras.

Composición proximal del producto.

A la mermelada con mayor nivel de agrado se le determinaron los componentes proximales. También fue caracterizada a través de análisis fisicoquímico evaluando el contenido de sólidos en ° Brix, que se determinó utilizando un refractómetro Abbe según AOAC [10] y el pH por método potenciométrico Prosky et al [11]. Las fracciones fibra dietética soluble e insoluble de acuerdo con los métodos descritos anteriormente para la fuente fibra.

Análisis Estadístico

Todas las pruebas fueron realizadas por triplicado y para el análisis de los datos se utilizó el programa Statgraphics 5.1, determinando medidas de tendencia central y de dispersión, realizando análisis de varianza de una vía y comparación de medias por diferencias mínimas significativas (DMS) con un 95 % de confianza y de acuerdo a los métodos señalados por Montgomery [13].

Resultados y discusión

Composición proximal de la cáscara de mango

En el cuadro 2 se indican los resultados obtenidos del análisis proximal realizado a la fuente de fibra. Puede observarse que en su mayoría está constituida por extracto libre de nitrógeno, esto es por carbohidratos digeribles e indigeribles. Los contenidos de minerales, proteínas y lípidos fueron menores al 1%, en tanto el contenido de fibra cruda fue menor de lo esperado. Esto puede explicarse porque la técnica de cuantificación de fibra cruda se basa en la digestión ácida y alcalina que permite determinar componentes como celulosa y hemicelulosa fundamentalmente AOAC [10], dejando escapar los componentes solubles como pectinas, gomas o mucílagos presentes en la cáscara de mango.

Cuadro 2. Composición proximal de la cáscara de mango como fuente de fibra (% b.s. excepto el contenido de humedad).

Componente	Cáscara de Mango
Humedad	(84.30 ± 0.50)
Cenizas	0.50 ± 0.01
Proteína Cruda	0.59 ± 0.02
Grasa Cruda	0.48 ± 0.01
Fibra Cruda	1.68 ± 0.05
E.L.N.	96.75 ± 0.40

Fraciones de fibra de la cáscara de mango. Fibra dietética total (FDT), insoluble (FDI) y soluble (FDS).

En el cuadro 3 se observan los resultados de las fracciones de fibra de la materia prima fuente de fibra.

Cuadro 3. Composición de fibra dietética de la cáscara de mango (g/100g)

Componente	Cáscara de Mango
FDT	14.37 ± 0.72
FDI	8.46 ± 0.01
FDS	5.91 ± 0.59

Si se considera el contenido de FDT como el 100% se obtendría que la fracción insoluble y soluble para la cáscara de mango, representarían el 58.87% y el 41.13%, respectivamente. Tomando en cuenta la recomendación de ingesta de 25 g de fibra al día de la [14], si un individuo consumiera alimentos que en su totalidad aportaran 25 g de fibra proveniente de la cáscara del mango se le estaría proporcionando 14.72 g de fibra insoluble y 10.28 g de fibra soluble; según Sungsoo et al [15], para que un alimento sea reconocido como una excelente fuente de fibra debe proporcionar más de 5 g de fibra soluble. Los valores antes obtenidos posicionarían a la cáscara de mango como una fuente excelente de fibra dietética con una buena relación de fibra soluble y fibra insoluble. La soluble, ayudaría a la disminución de los niveles de colesterol en la sangre, al control de glucosa en torrente sanguíneo en el caso de personas diabéticas, además de ser utilizado en las dietas contra la obesidad. En cuanto el residuo insoluble, se le relacionaría con la capacidad de disminuir las incidencias de cáncer colon/rectal, así como de diverticulitis.

Evaluación de las muestras

Análisis sensorial

El nivel de agrado de la mermelada se ubicó en 5.6 puntos (entre «gusta poco» y «gusta») para la mermelada con un nivel de incorporación de 20 % y de 5.8 (entre «gusta poco» y «gusta») para la mermelada con un nivel de incorporación del 30%. El análisis de varianza de la evaluación sensorial, indicó que la mermelada con mayor puntaje de nivel agrado, fue la adicionada con 30% de CM, sin embargo, por la variabilidad en la percepción, ambas resultaron ser estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

Composición proximal de la mermelada

Considerando los resultados del análisis estadístico y la mayor incorporación de la fuente de fibra, se procedió a realizar los análisis químico proximales a la muestra con mayor potencial (30% de CM), dado que es la que proporcionaría mayor beneficio a la salud y realizando la comparación con la mermelada control (sin adición de cáscara de mango) y los resultados se muestran en el cuadro 4.

En ambos productos puede observarse que el mayor componente fueron los carbohidratos. Sin embargo, puede destacarse el mayor contenido de fibra cruda en la mermelada adicionada con la cáscara de mango respecto a la mermelada control.

Cuadro 4. Composición proximal de mermelada con mayor nivel de agrado comparada con el control (%b.s, excepto humedad)

	Mermelada con 30 % de CM	Control Mermelada de mango
Humedad	(24.48 ± 0.38 ^a)	(25.29 ± 1.22 ^a)
Cenizas	0.18 ± 0.01 ^a	0.22 ± 0.02 ^a
Grasa	0.17 ± 0.06 ^a	0.27 ± 0.25 ^a
Fibra cruda	1.72 ± 0.47 ^a	0.81 ± 0.16 ^b
Proteína	0.27 ± 0.03 ^a	0.28 ± 0.01 ^a
E.L.N	73.16 ± 0.1 ^a	73.10 ± 1.16 ^a

^{a-b} Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística. ($P < 0.05$)

Los grados Brix para ambas mermeladas fue de 67, en tanto el pH fue de 3.3 para la adicionada con fibra y 3.2 para la mermelada control. Éstos resultados fueron similares a los reportados por López-Orozco et al [7], para mermeladas incorporadas con cáscara de tuna con 68 °Brix y pH de 3.41. Los valores obtenidos en el estudio indicaron que la mermelada de mango cumple con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana (NOM-130-SSA1-1995), en cuánto a dichos análisis, ya que las mermeladas de frutas deben poseer una concentración no mayor a 68° Brix para evitar la cristalización de los azúcares durante su almacenamiento [16]. Las mermeladas son clasificadas como conservas de acidez alta, por lo cual, el valor del pH de 3.2-3.3 obtenido puede considerarse aceptable para éste tipo de productos [17].

Fracciones de fibra del producto con mayor nivel de agrado.

Como era de esperarse, el mayor contenido de fibra dietética en la mermelada de mango fue debido al aporte de cáscara en la formulación (cuadro 5). Se han reportado comportamientos similares en un trabajo de investigación de mermeladas de tunas rojas, con aporte de 22.38 % de cáscara en la formulación, logrando un valor de 12 g /100 g de fibra dietética en la mermelada elaborada [18].

Cuadro 5. Composición de fibra dietética de la mermelada con mayor nivel de agrado comparada con el control (% b.s.)

Análisis	Mermelada con 30% de CM	Control Mermelada de mango
FDT	7.80 ± 0.36a	5.47 ± 0.31b
FDI	3.90 ± 0.25 a	2.15 ± 0.01 b
FDS	3.90 ± 0.36 a	3.32 ± 0.25 a

a-b Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística. (P< 0.05)

Es de destacar que la proporción de FDS y FDI fue del 50% en la mermelada adicionada con la cáscara de mango. Éste balance entre los dos tipos de fibra dietética resulta relevante ya que es un componente nutracéutico con diversos efectos metabólicos y fisiológicos en los seres humanos, tales como su capacidad laxante [19] y sus propiedades sobre la promoción de la saciedad [20]. Particularmente, la porción soluble promueve el retardo del vaciamiento gástrico, favorece el crecimiento de la microbiota y mejora la tolerancia a la glucosa [21]. Por su parte, la fibra dietética insoluble se asocia con el mejoramiento de la sensibilidad a la insulina [22], el incremento de la masa fecal, el mejoramiento del tránsito intestinal y la retención de sustancias lipídicas [23]. Esto resulta de relevancia para el presente estudio ya que, al poseer la mitad de fibra dietética soluble, pudiera aprovecharse la mermelada de mango rica en fibra como un producto con características de alimento funcional.

Conclusiones

La incorporación de fibra dietética utilizando cáscara de mango para la elaboración de mermeladas fue tecnológicamente factible. La fuente de fibra presentó cerca del 14% de fibra dietética total con un buen balance de fracciones solubles e insolubles. Mediante la evaluación sensorial se demostró que los consumidores tuvieron mayor aceptación del producto enriquecido con 30 % respecto al incorporado con 20 de cáscara de mango. Del total de la fibra dietética que aportó la mermelada de mango enriquecida, la mitad fue soluble y la otra mitad insoluble convirtiendo al producto en un alimento funcional que proporcionará los beneficios fisiológicos de ambos tipos de fibra a los consumidores.

Referencias

- [1] E. Sloan, «The Top Ten Functional Food.,» *Food Technology*, vol. 4, n° 54, pp. 33-62, 2000.
- [2] J. Gray, *Dietary fiber. Definition, analysis, physiology and health*, Brussels, Belgium: ILSE Europe Concise Monograph Series, 2006.
- [3] C. Martínez Villalueva, J. Frías y C. Vidal Valverde, «Raffinose family oligosaccharides and sucrose contents in 13 Spanish lupins cultivars,» *Food Chemistry*, vol. 91, n° 4, pp. 645-649, 2005.
- [4] J. W. Anderson, P. Baird, R. H. Davis, S. Ferreri, M. Knudtson y A. Koraym, «Health benefits of dietary fiber,» *Nutrition Reviews*, vol. 4, n° 67, pp. 188-205, Apr. 2009.
- [5] V. G. Saucó., «Mango production and world market: Current situation and future prospects. 1,» *Acta Horticulturae*, vol. 645, n° 1, pp. 107-116, Febrero 2004.
- [6] L. A. Bello Pérez, A. Aparicio Saguilan, G. Méndez Montealvo, M. Solorza Feria y E. Flores Huicochea, «Isolation and partial characterization of Mango (*Mangifera indica* L.) starch: morphological, physicochemical and functional studies.,» *Plant foods for human nutrition*, vol. 60, n° 1, pp. 7-12, Enero 2005.
- [7] M. López Orozco, J. Mercado Flores, Martínez Soto y J. L. Magaña Ramírez, «Formulación de una mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas (*Opuntia* spp.) elaborada a nivel planta piloto. *Acta Universitaria*,» vol. 21, n° 2, pp. 31-32, 2011.
- [8] C. M. Ajila, S. G. Bhat y U. J. Prasada Rao, «Valuable components of raw and ripe peels from two indian mango varieties.,» *Food Chemistry*, vol. 4, n° 102, pp. 1006-1011, 2007.
- [9] N. Berardini, M. Knodler, A. Schieber y R. Carle, «Utilization of mango peels as a source of pectin and polyphenolics.,» *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 6, n° 4, pp. 442-452, Diciembre 2005.
- [10] O. M. o. A. AOAC, *Association of Official Analytical Chemists*, 17 ed., Washington D.C. USA: William Horwitz, 2000, pp. 2-13, 14;25-28;32.
- [11] L. Prosky, N. Asp, T. Schweizer, J. Devries y I. Furda, « Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products; interlaboratory study.,» *Journal of AOAC*, vol. 5, n° 71, pp. 1017-1023, 1988.
- [12] R. M. Lutz, D. D. Morales, S. B. Sepúlveda y M. W. Alviña, «Evaluación sensorial de preparaciones elaboradas con nuevos alimentos funcionales destinados al adulto mayor.,» *Revista Chilena de Nutrición*, vol. 35, n° 2, pp. 131-137, Junio 2008.
- [13] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos.*, México, D.F.: Grupo Editorial Iberoamericana, 2003, pp. 119-149..
- [14] FAO /OMS, *Diet, Nutrition and Prevention of Chronic Diseases.*, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2003.
- [15] S. Sungsoo, L. Prosky y M. Dreher , *Complex carbohydrates in foods.*, 1 ed., New York, E.U.A.: Ed. Mercel Dekker, 1999, pp. 125,126, 327-329, 357.
- [16] J. L. Benavent, *Procesos de Elaboración de Alimentos. Dpto. de Tecnología de Alimentos.*, Valencia España.: Universidad Politécnica de Valencia., 1996, pp. 477-484..
- [17] D. M. Barrett, L. Somogyi y H. Ramaswamy, *Processing Fruits*, Washington, D.C: CRC Press , 2005, pp. 187-196..
- [18] M. M. Arias y C. F. Herrera, *Mejoras en el procesamiento de mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas*, Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2008, pp. 36-39..
- [19] Y. Jing, W. Hai, Z. Li y X. Chun, «Effect of dietary fiber on constipation: A meta analysis.,» *World Journal of Gastroenterology*, vol. 48, n° 18, pp. 7378-7383., 2012.
- [20] M. Kristensen y M. Jensen, «Dietary fibres in the regulation of appetite and food intake. Importance of viscosity.,» *Appetite*, vol. 56, n° 1, pp. 65-70., 2011.
- [21] B. E. Das Lipi , U. Raychaudhuri y R. Chakraborty, «Role of nutraceuticals in human health.,» *Journal of Food Science and Technology*, vol. 49, n° 2, pp. 173-183., Febrero 2012.
- [22] M. Kaczmarczyk, M. Miller y G. Freund, « The health benefits of dietary fiber: Beyond the usual suspects of type 2 diabetes mellitus, cardiovascular disease and colon cancer.,» *Metabolism*, vol. 61, n° 8, pp. 1058-1066., 2012.
- [23] D. Mugdil y Barak, «Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review.,» *International Journal of Biological Macromolecule*, vol. 61, n° 1, pp. 1-6., Octubre 2013.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

1. Los artículos deberán ser originales, inéditos y no pueden participar simultáneamente en otros procesos de publicación.
2. La extensión de los trabajos debe oscilar entre 10 y 20 páginas de 21,59 x 27.94 cm (8,5 x 11 pulgadas). Se debe presentar en un documento de Microsoft Word, con interlínea de espacio y medio, en una columna, en letra Times 12 pts.
3. Los títulos de los artículos deben ser sencillos, claros, cortos y estar en español e inglés.
4. Se debe indicar claramente el nombre y los dos apellidos del autor, nacionalidad, profesión, teléfonos, correo electrónico, dirección exacta, lugar de trabajo, país de origen de dicha entidad y el identificador de autor ORCID (si no tiene uno puede obtenerlo en <https://orcid.org/>).
5. Las palabras clave deben presentarse en español y en inglés. Además, el resumen debe estar compuesto por 250 palabras y aparecer en ambos idiomas.
6. Las imágenes se deben enviar en un archivo aparte del documento principal. En caso de ser escaneadas, la resolución mínima es de 300 ppi. Los formatos permitidos son: .jpg, .tiff, .eps, .psd y .ai.
7. Las fórmulas y ecuaciones matemáticas deben realizarse con el editor de ecuaciones de Word.
8. En lo pertinente, se usará el Sistema Internacional de Unidades.
9. La bibliografía debe aparecer al final del documento, ordenada según su aparición en el documento y utilizar el formato IEEE.
10. Los documentos deberán enviarse únicamente por medio de la página oficial de la revista www.revistas.tec.ac.cr/tec_marcha
11. La Comisión editorial no dará trámite de edición al artículo que no cumpla con estos requisitos.

Nota importante

Los originales serán sometidos a un proceso editorial que se desarrollará en varias fases. En primer lugar, serán objeto de una evaluación preliminar por parte de los miembros del Comité Editorial, quienes determinarán la pertinencia de su publicación. Una vez establecido que cumple con los requisitos temáticos y formales indicados en estas instrucciones, será enviado a dos pares académicos externos para decidir en forma anónima (doble ciego) si debe publicarse, si necesita cambios o si se rechaza. En caso de que ambos llegaran a discrepar, el artículo será enviado a un tercer evaluador, para tomar la decisión. Los resultados del dictamen académico serán inapelables en todos los casos. En caso de que el artículo sea aprobado para su publicación, el autor autoriza a la Editorial Tecnológica de Costa Rica para que lo incluya en la revista y pueda editarlo, reproducirlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero mediante medios impresos y electrónicos bajo la licencia *Creative Commons*.

Instructions to publish in **TECNOLOGÍA** *en marcha*

The journal *Tecnología en Marcha* is published by the Editorial Tecnológica de Costa Rica every three months. It focuses mainly in disseminating the results of research of engineering areas. The journal's contents are intended for researchers, experts, teachers and university students around the world.

1. All articles must be originals, unpublished, and cannot be simultaneously used in other processes.
2. Papers may be 10-20 pages long (8.5 x 11 in, or 21.59 x 27.94 cm). All documents must be submitted in MS Word, 1.5 line spacing, using Times 12 pts. font and in one column.
3. Article titles must be simple, clear, short, and be included in both Spanish and English.
4. The name and (two) last names of the author should be clearly indicated, along with their profession, telephone numbers, email, physical address, place of work (organization, department, school), where the organization is based and the ORCID number (if you do not have it, create it at <https://orcid.org/>)
5. The key words must be included in both Spanish and English. Furthermore, the abstract must be 250 words long, and should also be submitted in both languages.
6. The images must be delivered in a separate document. If scanned, the minimum resolution is 300 ppi. The formats allowed are .jpg, .tiff, .eps, .psd, and .ai.
7. Mathematical equations and formulas must be done with MS Office's Equation Editor.
8. Where necessary, use the International System of Units.
9. Bibliography will be included at the end of the document, arranged order based on IEEE format.
10. Papers should be sent to the following the web site www.revistas.tec.ac.cr/tec_marcha
11. The Editorial Committee will only consider for publication the articles meeting the above requirements.

Important note

All originals will be subject to an editorial process consisting of several phases. First, a preliminary assessment will be done by members of the Editorial Committee, the Director, and the editors, who will jointly determine whether the article would make a relevant publication. After determining that an article meets the thematic and formal requirements established in these Instructions, it will be sent to two outside academic peers who will decide anonymously (double-blind) whether it should be published, if it needs any changes, or whether it should be turned down. In case of disagreement between these peers, the article will be sent to a third evaluator in order to reach a decision. In no case may the results of this decision be appealed. If the article is accepted for publication, the author authorizes the Editorial Tecnológica de Costa Rica to edit, reproduce, distribute, exhibit and communicate at the country and abroad through print media and electronic equipment under the *Creative Commons* license.

Cronograma 2018

	Vol. 31-1	Vol. 31-2	Vol. 31-3	Vol. 31-4	Vol. 32-1	Vol. 32-2	Vol. 32-3
Recepción de artículos	Mayo - julio 2017	Agosto - octubre 2017	Noviembre 2017 - enero 2018	Febrero - abril 2018	Mayo - julio 2018	Agosto - octubre 2018	Noviembre 2018 - enero 2019
Evaluación de expertos y aprobación	Agosto - setiembre 2017	Noviembre - diciembre 2017	Febrero - marzo 2018	Mayo - Junio 2018	Agosto - setiembre 2018	Noviembre - diciembre 2018	Febrero - marzo 2019
Revisión de estilo y corrección	Octubre 2017	Febrero 2018	Abril 2018	Julio 2018	Octubre 2018	Enero 2019	Abril 2019
Diagramación y correcciones finales	Enero 2018	Marzo 2018	Mayo - junio 2018	Agosto - setiembre 2018	Noviembre - diciembre 2018	Febrero - marzo 2019	Mayo - junio 2019
Publicación del número	Febrero 2018	Mayo 2018	Julio 2018	Octubre 2018	Febrero 2019	Abril 2019	Julio 2019