



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Octubre - Diciembre 2023
Volumen 36-4
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melICA

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Científica

DOAJ

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 36-4. Octubre-
Diciembre, 2023 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

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.

Publicación y directorio en catálogos





TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

A study of conversational agent solution technologies for banana farmer assistance Un estudio de tecnologías sobre agentes conversacionales para la asistencia de agricultores del plátano <i>Luis-Alexander Calvo-Valverde, Kevin Rojas-Salazar, Jose Fabio Hidalgo-Rodríguez, Versalio Mora, Jorge A. Sandoval, Erick Bolaños-Céspedes, Carlos Quirós</i>	3
Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión Effect of variable air flow on the energy efficiency of a centralized combustion air system <i>Secundino Marrero-Ramírez, Orlando Vega-Areas, Iliana Antonia González-Palau</i>	19
Efecto de dos porcentajes de drenaje y de un bioestimulante en pepino (<i>Cucumis sativus</i>) producido bajo invernadero Effect of two drainage rates and a biostimulant in cucumber (<i>Cucumis sativus</i>) grown under greenhouse conditions <i>Julio César Loáiciga-Arias, José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	31
Breve mirada técnica a 12 años de diseño y construcción de Vivienda de Interés Social: Caso de las auditorías de calidad del CFIA Brief technical look on 12 years of design and construction of Social Interest Housing: Case study of CFIA's quality audits <i>Erick Mata-Abdelhour</i>	45
Valor del peso específico del cemento para diseño de concretos Specific gravity value of cement for concrete design <i>Víctor Manrique Obando-Angulo</i>	59
Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México Calculation of biogas generation by the anaerobic digestion method from biomass extracted from the Ecatepec's central de abasto, Mexico <i>María Concepción Martínez-Rodríguez, Lorena Elizabeth Campos-Villegas, Brandon Piña-Garrido</i>	68

Análisis de flujos hidrodinámicos bidimensionales en superficies de los taludes del trópico

Analysis of two-dimensional hydrodynamic flows on tropic slope surfaces

Ronald Andrés Rodríguez-Poltronieri, David Borge-Leandro 76

Remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de plantas de tratamiento de aguas residuales del Gran Área Metropolitana, Costa Rica

Remotion of physicochemical and microbiological parameters on wastewater treatment plants in Costa Rica's Great Metropolitan Area

Luz María Chacón-Jiménez, Eric Morales-Mora, Ernesto Alfaro-Arrieta, Carmen Valiente-Alvarez, Lilliana Reyes-Lizano, Kenia Barrantes-Jiménez 94

Gestión cromática en la evaluación de lesiones melanocíticas

Chromatic management in the evaluation of melanocytic lesions

Mac-Arturo Murillo-Fernández, Luis-Alexander Calvo-Valverde, Ernesto Montero-Zeledón, José-Esteban Pérez-Hidalgo, Dionisio-Alberto Gutiérrez-Fallas, Daniel Gutiérrez-Araya 107

Diseño de dos propuestas de obras de conservación de suelos para mitigar daños en un terreno con problemas de erosión tipo cárcava, Zona de Los Santos, Costa Rica

Design of two proposals for soil conservation works to mitigate damage in a land with gully-type erosion problems, Los Santos area, Costa Rica

Mariela Chinchilla-Ureña, Isabel Guzmán-Arias, Fernando Watson-Hernández, Catalina Vargas-Meneses 124

Modelación hidrodinámica de un tramo del río Purires a la altura del nuevo hospital, ante un posible escenario de cambio climático

Hydrodynamic modeling of a section of the river Purires at the height of the new hospital, in a possible climate change scenario

David Borge-Leandro, Pablo Fernández-Campos 137

Evaluación de la salud ambiental del río Ocloro, utilizando una metodología mixta

Assessment of the Ocloro River's environmental health, using a mixed methodology

María Chaves-Villalobos, Jose Quirós-Vega, Stephanie Cordero-Cordero, Jenny Villalobos-Sequeira, Deivis Anchía-Leitón, Alonso Loría-Barquero, Daniela Luna-Salas, Ana Fung-Méndez, Mónica Paniagua-Pantoja 148

Estudio de altas densidades de siembra en la producción de maíz (*Zea mays*) híbrido

Study of high planting densities on the production of hybrid maize (*Zea mays*)

Daniel Alejandro García-López, Rafael Alonso Hernández 160

Toxicología de micro y nanoplásticos: riesgo de tóxicos a dosis baja y cambios epigenéticos

Toxicology of micro and nanoplastics: risk of toxic at low dose and epigenetic changes

Virginia Montero-Campos, Lucía Noboa-Jiménez, Luis Gómez-Vargas 169

Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua

Community water monitoring strategy for the Jorco river micro-basin based on the analysis of physicochemical, microbiological and biological indicators of water quality

Guillermo Calvo-Brenes, Karla Salazar-Céspedes 181

A study of conversational agent solution technologies for banana farmer assistance

Un estudio de tecnologías sobre agentes conversacionales para la asistencia de agricultores del plátano

Luis-Alexander Calvo-Valverde¹, Kevin Rojas-Salazar²,
Jose Fabio Hidalgo-Rodríguez³, Versalio Mora⁴, Jorge A.
Sandoval⁵, Erick Bolaños-Céspedes⁶, Carlos Quirós⁷

*Fecha de recepción 4 de octubre, 2022;
Fecha de aprobación: 19 de febrero, 2023*

Calvo-Valverde, L.A.; Rojas-Salazar, K; Hidalgo-Rodríguez, J.F; Mora, V; Sandoval, J.A; Bolaños-Céspedes, E; Quiros, C. A study of conversational agent solution technologies for banana farmer assistance. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 3-18.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6242>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: lcalvo@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3802-9944>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: kevin.rojas7@estudiantec.cr
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: josefabio20@estudiantec.cr
- 4 Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica.
Correo electrónico: vmora@mag.go.cr
- 5 Corporación Bananera Nacional (CORBANA). Costa Rica.
Correo electrónico: jsandoval@corbana.co.cr
- 6 Corporación Bananera Nacional (CORBANA). Costa Rica.
Correo electrónico: ebolanos@corbana.co.cr
- 7 Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Costa Rica. Correo electrónico: c.f.quirros@cgiar.org

Keywords

Artificial intelligence; agriculture; automation; expert; expert system.

Abstract

Modern agricultural extension services help as a source of information for farmer queries. One of its applications are local hot lines where expert agents in specific crops or fields assist in farmer agricultural practices and decisions. As an already established technology in the field of customer services, conversational agents can help this solution by covering for experts when users have difficulties contacting them. These artificial agents can answer general queries at any hour, increasing the extension service accessibility. The creation of a contextualized solution is possible with the advancements of Natural Language Processing (NLP) and its accessibility in cloud services. We write this paper to collect state-of-the-art research on agricultural conversational agents and tools used for its design and deployment. General knowledge on current applications is gathered and can later be used to help in the design of a localized solution when agricultural services are difficult to access. Lastly, we describe and analyze a chatbot prototype in the specific field of banana farming using IBM Watson services and the messaging platform Telegram App.

Palabras clave

Inteligencia artificial; agricultura; automatización; experto; sistema experto.

Resumen

Los servicios modernos de extensión agrícola ayudan como una fuente de información para las consultas de agricultores. Una de sus aplicaciones son las líneas telefónicas locales donde agentes expertos en cultivos o campos específicos asisten en las prácticas y decisión de los agricultores. Como una tecnología establecida en los campos de servicio al cliente, los agentes conversacionales pueden ayudar a esta solución cubriendo a los expertos cuando los usuarios tienen dificultades en contactarlos. Estos agentes artificiales pueden responder preguntas generales a cualquier hora, aumentando la accesibilidad a los servicios de extensión. La creación de una solución contextualizada es posible con los avances del Procesamiento del Lenguaje Natural y su accesibilidad en los servicios de la nube. Este artículo presenta el estado del arte en cuanto a agentes conversacionales en agricultura y las herramientas utilizadas para su diseño y desarrollo. Se presenta conocimiento general sobre las aplicaciones actuales, de manera que pueda ser utilizado para ayudar en el diseño de nuevas soluciones. Por último, se describe y analiza un prototipo de "chatbot" en el campo específico de la plantación de banano utilizando servicios de IBM Watson y la aplicación de mensajería Telegram.

Introduction

A lack of information can leave farmers susceptible to problems such as crop diseases, malpractices, and pests. Agricultural extension services aim to offer a communication line with expert agents that can assist farmers with their decisions. Issues like living in locations without them or been left waiting for an undesirable amount of time can leave a portion of farmers without access to the service. These problems can be caused by a lack of personnel as well as not being able to assist great amounts of clients within work hours.

Chatbots, referred as well as conversational agents, can be created to cover for experts when they cannot reach farmers by simulating the answers to common queries. This bot can work as automatic systems outside work schedule and depending on their design can be installed as apps or accessed through the internet. Farmers who have a smart cellphone or computer can use them without the need of an extension service near their location. Some examples of a similar approach can be seen in customer service on the private sector, such as the ones found in [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7].

Conversational agents have different approaches varying in their designs and technologies. Modern Natural Language Processing (NLP) create new possibilities and features outside of the conventional question-answer conditional commands. Such is the case of generating answers with a machine learning model instead of choosing them from a pool of knowledge and understanding different variations of singular user response. These create more robust and human like chatbots.

Similar research in the topic of farmers and conversational agents is presented in [8]. In which a study is conducted to categorize important topics for farmers and describe a problem of information accessibility, then describe a conversational agent as a reliable solution. In this paper we differ by focusing on the collection of tool information for the design and development of agent solutions for farmer assistance. We also developed a chatbot centered in a specific topic in banana farming while also focusing on presenting state-of-the-art technical research and concepts. Information that can later be used for the construction and design of similar agricultural conversational agents.

When designing a conversational agent for agricultural assistance some fields must be established. Each agent is different depending on the crops, topics, or locations in which they are to be used, as well as the information needed and their access methods. Because of this, a variety of approaches are reached to solve the necessities of farmers. This paper is aimed to discuss a collection of different implementations with the focus on creating a body of knowledge, of design choices and aspects, that can later be used on the design and creation of new artificial agents.

Firstly, the section “Chatbots and Assistants” explains the terminology and concepts used around the different conversational agents and how they can be categorized depending on their features. Then, the section “Natural Language Processing in Conversational Agents” details the theory behind the major tool focused on this paper for chatbot design. We continue with the description of a set of tools and platforms based on Natural Language Processing (NLP) for the creation of conversational agents in the section “Conversational Agent service platforms”. In “Conversational Agent Research” a list of chatbot implementations of different approaches is detailed and discussed. We also document the technical aspects for a created chatbot prototype. This can be seen as a possible solution to the topic of banana farming and was developed using IBM Watson services and Telegram App, in “Materials and methods (methodology)”. We further describe recommendations and experiences while developing it in “Results” where we also explain the design decisions chosen.

Chatbots and Assistants

When referring to conversational agents the terms chatbot and virtual assistant are used interchangeably. Although many sources prefer to use the term chatbot, a differentiation in this paper is defined.

We will be referring to chatbot the same way as [9] refers to it, as a "... computer program designed to interact with users via textual or auditory methods using artificial intelligence". The thesis in [10] focused on the development of a chatbot, briefly describes them as being capable of contextualizing conversations. Other variations of the term can be found in the literature such as voicebot or just bot. There are also instances such in [11] where it is referred to as chatterbot.

Virtual assistants tend to refer to systems like Amazon's Alexa, Microsoft's Cortana or Apples's Siri. We use the definition by [12] that defines it as an agent that helps users interact with their software as a sort of voice or text interface. This definition aligns with the examples shown above.

These terms can be used on similar contexts since both refer to agents capable of establishing a conversation with a human user. But there is a fundamental difference in these definitions. A chatbot can hold a conversation but not perform actions involving the user's personal computer or software. These activities such as interfacing with the personal software, normally access through other means, are refer to virtual assistants.

In this paper we will be focusing on the creation and design of chatbots as a conversational agent. This, given its simplicity and task-oriented approach useful in question-answering conversations.

When designing a chatbot there needs to be a definition of its complexity and scope. This facilitates the selection of technologies to use. Chatbots can be classified depending on their approach. Positioning a chatbot in such a classification can help to find the features needed. A broad classification by topics is shown in [13] listed and detailed below.

- **Conversational flow:** If it communicates using specific conversational flows is considered Rules-Based. Contrarily if the chatbot uses Artificial Intelligence (AI) to increase the amount and variance of its communication it is considered AI-Based.
- **Goal:** A conversational bot is designed to entertain the user with general topics and open conversation. A task-oriented bot focuses on a specific task and topic.
- **Respond technologies:** Chatbots can be classified depending on the technology used to retrieve their answers. A bot that uses a bank of possible answers is considered a retrieval-based bot, their answers are limited and learned from the creation. In the other hand a bot that can generate new answers with the help of AI is considered a generative bot. This uses Natural Language Processing (NLP) solutions to generate new answers based on previous training of the model.

Depending on the chosen categories, chatbot implementations can become more complex and robust. Such is the case of a conversational bot being more complex than a task-oriented one.

The creation of a bot trained in every sort of conversation is also referred as open domain. Companies such as Google [14] and Facebook [15] have propose these types of chatbots. A solution to farmer assistance must be an agent simple to adapt in any context. This means to choose categories that can achieve that.

The chatbots found in this work can be classified as AI-Based generative task-oriented bots focusing on the assistance of farmers. Their focus is on question-answering. Either on the communication of best practices, advice on their craft, or weather telling. Although some chatbots can be created with the help of high-level tools, a variation of the same technologies can still be used. The next subsection defines the uses of Natural Language Processing (NLP) on AI-based chatbots.

Natural Language Processing in Conversational Agents

Natural Language Processing (NLP) is usually considered a branch of artificial intelligence that focuses on providing tools for computers to understand our language. In [16], it is defined as a sub-discipline of computer science providing a bridge between natural languages and computers. It empowers machines to understand, process, and analyze human language.

It covers multiple areas that are of great use to understand language, for example sentiment analysis, automatic translation, language generation, and many more. It is the combination of these different Natural Language Processing (NLP) applications that makes the design and development of an AI-based chatbot possible. For example, if a chatbot is needed to understand spoken language a module based on voice recognition may be of use. Also, if a chatbot may become universal if a language translation module is used.

Question-answering can use language modeling and language generation to detect sentence intents and generate answers. It is because of all these tools that chatbots can effectively converse with users.

Some datasets related to voice have been found and are presented in Table I. They can be useful in training models targeted to voice recognition or text to speech. We also collected some question response pairs datasets for generative models in Table II.

Even though Natural Language Processing (NLP) is an ongoing branch of study, companies have created stable and robust models. There are cloud platforms focused on the design and creation of chatbots. This may result in a more accessible approach to the solution. A chatbot can be created to assist farmers in a platform compatible with different services such as phone calls or chat applications. Depending on the service, the process could be potentially quicker and more robust.

Conversational Agent service platforms

Developing a chatbot or other conversational agent is a complex task that requires a flexible set of tools. Different companies came with platforms that provide said tools and streamline the process of creating these conversational agents.

Some provide a full service where one can design, model, train and deploy the chatbot, usually with added costs; and others are free and open source but are more limited and require more development on the users end so that the chatbot is evaluated and deployed.

In [9] an important study was conducted on the platforms: Kore [17], ChatFuel [18], Microsoft Bot Framework [19], Microsoft Azure [20], Heroku [21], AWS Lambda [22], and IBM Watson [23]. This paper focused in gathering details regarding the service functionalities and providing a contrast between them. Since it offers a wide range of information, we will be describing the most notable points found on this research for the construction of an agent solution.

The study in [9] describes information about different platforms. This includes if it has AI built in, their usage complexity and the amount of time it takes to have the platforms up and running. These features are listed next with their respective platform.

- **Kore:** It has AI built in. Does not require programming. High level of complexity. Built-in IDE. Need 10 minutes to setup. Pre-study time around 8 hours.
- **Microsoft Bot Framework:** It has AI built in. Requires programming. High level of complexity. Uses Visual Studio. Need 1 hour to setup. Pre-study time around 8 hours.
- **Microsoft Azure:** It has AI built in. Requires programming. High level of complexity. Built-in IDE. Needs 15 minutes to setup. Pre-study time around 8 hours.

- **IBM Watson:** It has AI built in. Does not require programming. Medium level of complexity. Built-in eclipse. Needs 4 hours to setup. Pre-study time around 8 hours.
- **Chatfuel:** It does not have AI built in. Does not require programming. Low level of complexity. Built-in IDE. Need 10 minutes to setup. Pre-study time around 4 hours.
- **Heroku:** It does not have AI built in. Require programming. High level of complexity. Uses Eclipse Atom. Needs 2 hours to setup. Pre-study time around 8 hours.
- **AWS Lambda:** It does not have AI built in. Require programming. High level of complexity. Built-in Eclipse and command line. Needs a whole day to setup. Pre-study time around 16 hours.

In [9] each platform gets a small section of advantages and disadvantages; in the case of Kore, it is said that it is an extensive platform but has a steep learning curve. Same learning curve problem is present in Heroku and AWS Lambda, but the former also is a single development platform while the later provides serverless deployment.

Finally, [9] describes Chatfuel as a plug'n'play but with limited possibilities. Microsoft Bot Framework is the most extensive but needs setup and deployment. Microsoft Azure has an integrated environment but only has preview mode. Lastly IBM Watson has High quality interactions yet limited options for integration. Detailed research using IBM Watson is found in [24]. Also, a demo of this service can be found at [25].

Most of these platforms have AI built in, it is common as well for the platform to have a high level of complexity and to require programming which can be a problem when there is the need of designing models in a fast way or to make tests. Times for setup and study the platform vary which is natural since all have been designed to cater to different users. And common downsides are that of a steep learning curve or limitation, the former comes from the idea above, while the latter usually has to do with a paid aspect of the platform or implementation and other circumstances such as support for different communication channels.

Conversational Agent Research

This study collected a series of state-of-the-art research regarding solutions to agricultural assistance using chatbots. General information of such papers and their agent implementations can be seen in Table III. The papers detail the design and implementation of such agents. These offer different approaches to a similar problem. We also found no external links to the created agents for any of the research listed.

In [26] a bot named FarmChat is created for a specific zone in India. This bot focuses on helping potato farmers in decision making. The paper shows an example of an end-user designed chatbot. A voice interface is implemented for illiterate farmers as well as a voice with text option for user accessibility. Another feature is the translation between the local language and English.

FarmChat was created using IBM Watson Conversation (currently known as IBM Watson Assistant), Google's Speech-to-Text and Google's translation service. Using the dataset found in [27], the most important topics and the responses were studied. This created a localized chatbot with topics like disease and pest guidance, weather information, practice advice, and recommendation on products. The paper also investigates the user response to the solution presented.

This research [26] shows that agriculture assistance is localized. Farmers on a zone may require specific advice adapted to their condition such as weather, practices, available commercial zones, or language. Places may also have a low percentage of literacy. This shows an important aspect on chatbot design. The end-user characteristics and necessities should be considered.

The chatbot named Agribot presented in [13] consists of three modules: a conversational module, disease detection and weather information. The first module is a sequence-to-sequence model trained on question-answer data collected from various sources such as web-scraping and structured datasets.

The disease detection module consists of a Convolutional Neural Network (CNN) trained on the detection of diseases in leaves. These are from different crops found in the public dataset [28]. It can be used to interact with the text module to facilitate the description of plant diseases and offer more accurate advice.

Agribot demonstrates the scalability in the design of chatbots. Instead of being restricted by a single textual module for communication it uses a Convolutional Neural Network (CNN) to improve user experience. The bot is also capable of using external services by communicating with an API. All outside of the Natural Language Processing (NLP) module.

A further example on these communication between services is AgronomoBot [29]. This bot focuses in facilitating data from a Wireless Sensor Network implemented in a vineyard. Using telegram as the means of communication and delivery of reports. The bot also uses an eKo WSN API with IBM Watson Assistant to communicate data. The main objective is to use natural language to obtain information by sensors that detect various topics on the field.

AgronomoBot offers a different approach where farmer assistance is not limited to agricultural knowledge. A bot can help farmers by offering information of their fields by communicating with an external system. In this case, procuring information needed for farmers to make decisions in a personal vineyard. It shows a system where chatbots are used as a more user-friendly interface of a system. This provides users with the capability of using natural language to communicate with a system.

In [30] a chatbot named “Agriculture TalkBot” is described in educating modern day farmers and implementing accessibility to people with disabilities. It is a simple chatbot made with a custom chat interface that can provide information regarding the best crop for the type of soil, best season for each crop and possible gain from each crop, while also providing speech synthesis to help people with disabilities.

The chatbot “Agriculture TalkBot” is made up of various modules, each with a responsibility: a query preprocessing module that takes the user input and process it, so it is easier for the system to handle and find the information requested, it uses multiple Natural Language Processing (NLP) tools. Then the chatbot development and training module trains the neural network to help in the answer retrieval. A module in charge of the response retrieval, employs the neural network to obtain the response to the query. Lastly, the answer is returned, and a speech synthesis module uses an API to allow the chatbot to send the audio output.

A modern solution to the pandemic is [31], proposes a solution that gives farmers information about tending crops and productivity with questions to the effects of the pandemic in agriculture. It uses Chatterbot, a popular library, to process the user inputs and produce the responses. There is also a Natural Language Processing (NLP) approach that works similarly to the Chatterbot one but uses Convolutional Neural Network (NLTK) to process the language of the query.

Initially, Agrochatbot was designed with the idea of providing information for multiple agriculture related subjects and as a general contrast between AI-based and rule-based chatbots. But then the Coronavirus epidemic took hold, and this caused adverse effects on the agriculture, because of that the chatbot was adapted to also aid and provide information related to the situation with the pandemic, particularly by helping in answering the farmer complaints.

Given these approaches a collection of important aspects in design is found. Agriculture is localized meaning that a solution should contemplate the necessities of such a user. This could affect the user-bot interface, or the level of language needed.

Chatbots are flexible in the sense of communication between services. It can become more complex and robust depending on the technologies used. A solution is not restricted to a single topic. Different farmers may have varied necessities in information. It could be best practices in their field or a better way to access certain information. The last one regarding information of their own field or a database of knowledge.

Table 1. Found audio datasets.

Name	Author	Accessibility	Language	Content
Pedagogic Corpora for Content & Language Integrated Learning	[32]	Author permission	English, Spanish.	Interviews
CSS10	[33]	Apache 2.0 - License	English	Audiobooks

Fuente: [32], [33].

Table 2. Structured question-response datasets.

Name	Author	Accessibility	Language	Format
Chatterbot-corpus	[34]	BSD 3-Clause "New" or Revised License	English, Spanish, others.	yml
KCC	[27]	Government Open Data License - Inida	English, Hindi.	json

Fuente: [34], [27].

Table 3. Analysis of found chatbots.

Agent	Agribot	Farmchat	Agronomobot	Agriculture TalkBot	AGROCHATBOT
Citation	[13]	[26]	[29]	[30]	[31]
Year	2020	2018	2018	2019	2020
Language	English	Hindi & English	Portuguese	English	N/a
Interface	Text	Voice + Text & Only voice	Text	Text + voice	Text
Platform	Telegram Bot	Mobile App	Telegram Bot	Server App	Chatterbot
NLP Model	LSTM model	IBM Watson	IBM Watson	N/a	Chatterbot model
Species	N/a	Potato	Gapes for wine production	N/a	N/a

Fuente: [13], [26], [29], [30], [31].

Materials and methods

This research focuses in developing a chatbot service that can provide useful information to farmers regarding crops, illness, and pests and how to handle them. As such searching, compiling, and analyzing relevant data was necessary to properly develop the chatbot so that the information provided would be accurate and useful. A process for literature survey was necessary to obtain and analyze data efficiently since there is plenty of literature to handle, however, no process was described in papers that were initially used as a template for this research. Because of that, a literature survey process was design such that the research could go forward with data that was considered adequate for our purpose.

As part of the process, different sources of data where analyzed, including datasets for audio, question-response, and already created chatbot research, as seen in the previous tables. The former datasets could help define better responses to questions and understand the more common problems that farmers have while the latter can be useful to construct the chatbot.

The process of literature survey starts with identifying key words regarding the research topic, this to extract the main ideas and concepts to cover and to use when searching. Using the keywords identified, different queries were used to obtain results such as: connecting words, using phrases containing keywords and employing wildcards. This is further refined by considering year of publication, the source, number of citations and searching the abstract. Some of the most common sources for papers where academic databases that included degree works, articles and journals from different countries.

With a certain number of papers, the process changed, and each document was read to determine if it contained new information or was too like other documents already read, if so then it was discarded. With this, the number of papers was reduced, and we had papers from different sources that contained different topics related to the topic of research.

For this project, a prototype chatbot named “HolaTalia chatbot” was developed with the intention of creating a functioning conversational agent capable of providing information to banana farmers. The main tools used were from IBM Watson services including Assistant for handling conversations, Speech to text and Text to Speech for handling only-audio mode, and Discovery for databank searches. The chatbot is designed to be accessible through a cellphone or a computer with Telegram app and to facilitate accessibility by providing a text and audio modes with voice recordings. This later is accomplished by adding an additional layer of logic that communicates with services that allow the handling of speech to text, so that the assistant module can interpret the answer given the recording, and text to speech through the same media.

The topic focused on is overturning or toppling in banana plants. This is a serious problem with multiple possible causes such as pests, illness, weather or even a poor soil management. The chatbot can attain its causes by asking a series of questions to the user about their banana plantation.

Although overturning is the main topic, an additional module was created for handling user requests on further information about different subjects found in a selected collection of data obtained for a knowledge bank. The data was provided by the Ministry of Agriculture of Costa Rica and the Spanish section from Musapedia – ProMusa found at [35] . The first is a collection of pdf files on relevant topics involving local farmers, while the latter are Spanish web entries in knowledge around the crop’s agriculture. The prototype does a search through this document and returns the file that contains the most related terms. This is accomplished by using the IBM Watson Discovery service.

The middleware is also capable of recording the overturning causes and answers by the user to improve their experience. In this case the questions regarding the location are omitted due to already knowing them. This was developed using a local database with SQLite. Same principal of local storage and portability was implemented for the documents form the knowledge bank, this are in PDF format located in a folder to send them as files to the user after a Discovery request.

HolaTalia chatbot asks the user for information about the type of soil, the management of the pests and illnesses, fertilization, and other details to help narrow down the cause of the toppling and provide the insight of the cause. This process is done with an orchestrator-microservice architecture. A middleware was created using Python 3.7 which receives messages from Telegram App and controlling the communications with the IBM Watson Services to send a response.

The main middleware components are the “telegram_service” module which handles Telegram requests by using a library called “pyTelegramBotAPI” that can be found at [36], the Watson Services module which communicates with their respective official IBM APIs, the “model” module which controls the local SQLite and holds the KnowledgeBase files, and finally the “controller” module which communicates between the Watson Services modules and the localized database. The prototype components can be seen represented in Figure 1 and as shown, it was deployed to a Heroku app so that it can be accessed without the need of a local computer.

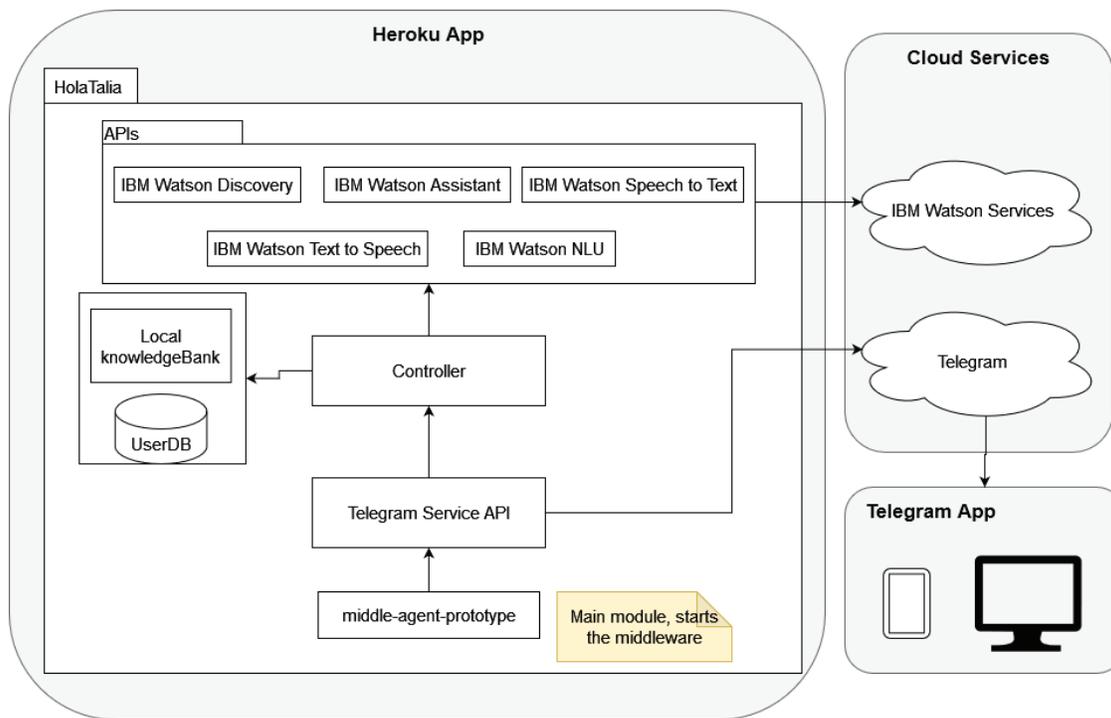


Figure 1. Structure of the prototype chatbot.

Results

From the previous paragraph, it becomes clear that the bot is usually a complex combination of components, even a simplified version like the one we designed, contains multiple functional modules, and is only bound to grow and complexity. Despite this, the increase of complexity does not mean that the chatbot will be more used by users, instead other aspects may be more relevant to the performance of the bot with the audience.

We found two major aspects for user engagement when designing a specialized chatbot in banana farming. The first is user experience tweaking, creating natural sounding conversations for the user's paying attention to details such as local vocabulary, user relevant topics, and accessibility functionality such as the audio-only mode. For the solution to be useful the system must help the specific demographic of banana farmers. The second aspect refers to the technical tools used. This includes finding useful tools to handle the conversation aspect such as speech recognition, text to speech tools, and understanding questions and answers.

Great effort was put into the design aspect. This requires the work of many multidisciplinary helps to create a solution that manages to help the main demographic. The information collected had to be analyzed and picked for its relevance to local farmers, as well as presented in an accessible way.

A solution may not be successful if it does not meet the farmers necessities even if it is technologically capable. This left to the conclusion that in cases where time is limited a greater focus can be put to this part and less to actual development. The later can be speeded up by using tools with already established NLP services. Although this was the approach used, the training of a personal machine learning model can tailor answers to be more specific and varied. There are open-source tools such as Plato research dialogue system found at [37] that permit this in the context of conversational assistants.

It was found that a rule-based inspired bot assisted by NLP tools can be a recommended solution for chatbots where a defined conversation is followed. IBM Watson Assistant was the service used for this. While the chatbot follows preestablished conditional responses, NLP helps in grouping user messages by intents and extracting variables needed for context. This helps in developing a bot that creates conditions with context rather than specific sentences. Although the service permits randomization of preestablished responses, it is still a very rule-based approach. A generative model could create a more natural conversation but given the very technical situations where the answers must be precise this approach could be considered unreliable.

Some considerations when working with cloud services is their communication issues. Services may or may not be available at a time. We recommend a robust orchestrator capable of handling these situations.

Using Telegram as the primary form of chat interface allows greater flexibility for user accessibility and development with open-source tools. Farmers can access the chatbot through mobile and web platforms that communicates with a single middleware server. An example conversation can be seen using Telegram Web in Figure 2 and the smartphone application in Figure 3 and 4.

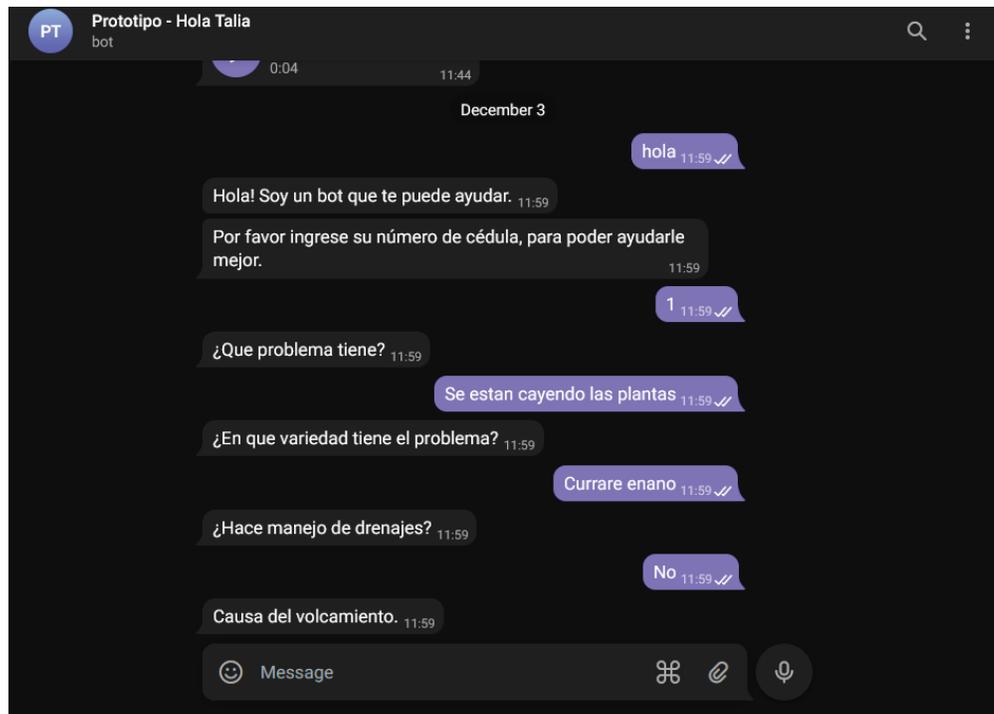


Figure 2. Conversation with the chatbot on Telegram Web.

Translation: "User: Hello

Bot: Hello! I am a bot that can help you.
Please input your identification, to help you better.

User: 1

Bot: What problem do you have?

User: My plants are overturning

Bot: In what variety does the problem present?

User: Currare Enano

Bot: Do you do drain management?

User: No

Bot: Possible cause of overturning."

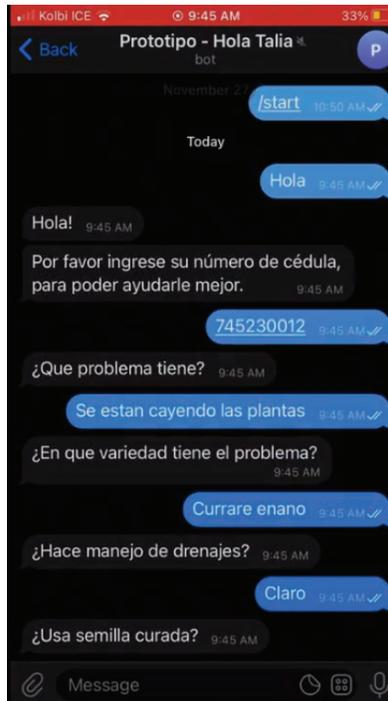


Figure 3. Conversation with chatbot on Telegram mobile.

Translation: "User: Hello

Bot: Hello!

Please input your identification to help you better.

User: 745230012

Bot: What problem do you have?

User: My plants are overturning

Bot: In what variety does the problem present?

User: Currare Enano

Bot: Do you do drain management?

User: Sure

Bot: Do you use cured seed?"

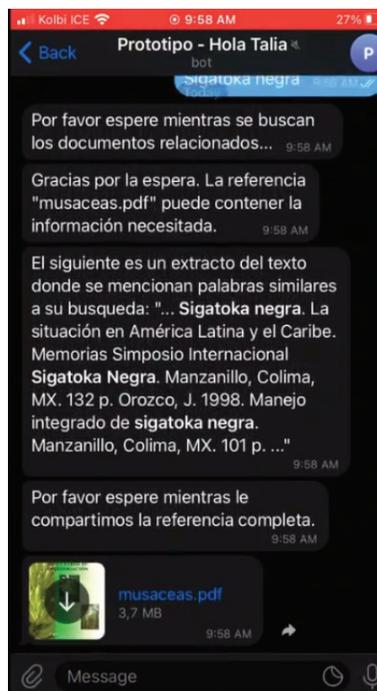


Figure 4. Conversation with query to Discovery service.

Translation: "User: Black Sigatoka

Bot: Please wait while the related documents are searched ...

Bot: Thanks for waiting. The reference "musaceas.pdf" may contain the information needed.

Bot: The following is an excerpt from the text where words like your search are mentioned: "..."

Bot: Please wait while we share the full reference with you."

Conclusions

In this position paper we collected relevant research needed in the design and implementation of a chatbot conversational agent. We then proceeded to create a prototype artificial agent following this knowledge with the purpose of improving the distribution of information to banana farmers assisting agricultural conversational services.

While researching, we found some ambiguity on the terms used to describe and categorize artificial conversational agents. Therefore, we described in detail the different terms and variations based on our findings that will set the context of this paper. We found two main categories: chatbots and personal assistants. The first referring to a computer program capable of interacting with a user through conversation, and the later as a program focused more on interfacing with other personal software. We also collected different literature categorizations depending on the conversation flow, goal, and respond technologies of a chatbot.

We focused in chatbot programs as a more suitable technology for our purpose. This given our goal in assisting farmers since the personal assistant alternative focuses on scopes beyond our communication issue. In terms of response technologies an AI-based solution is considered as a more human-friendly approach compared to the more scripted rule-based conversational agent, even though a robust solution may consider both. We then proceeded to focus on the description of Natural Language Processing in chatbots as a main option for AI solutions.

There are many different approaches in designing and implementing chatbots, a consideration may be the use of established services or platforms. For this topic, we collect information from relevant research on different cloud platforms with the intention of facilitating their choice.

We also present different state-of-the-art implementations for farmer assistance and analyze their qualities and features; each research has a unique context and therefore a different approach to the problem. Given this nature, we focus on analyzing the aspects that make the solution relevant for their specific context to give an idea of the possible features and solutions that a conversational agent in agriculture may require.

Lastly, we present a prototype solution developed using IBM Watson services for the creation of chatbot assistant in the field of banana farming using the Telegram bot as a user interface. We focused in determining the causes for a banana plantation problem called overturning by asking the user a series of queries.

This prototype implements already established services for the creation of chatbots. In our future work a through description on Natural Language Processing applications can be explored. This to train and deploy a model capable of functioning as a conversational agent.

In this work we used different pdf files as our data, but Web Scraping tools may also be considered for future work. Also, the creation of a list of most relevant questions a user may ask may be an import aspect in choosing such information. Farmer information priorities can change, so a solution must consider this in its design. Also, service response time is important when considering user experience with chatbots.

Acknowledgements

This work was undertaken as part of, and funded by, CGIAR Platform for Big Data in Agriculture in the context of “Hola Talia - Boosting accessibility of agricultural advice through conversational human-machine interaction” project.

Bibliography

- [1] World Health Organization, “who.int,” [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/who-health-alert-brings-covid-19-facts-to-billions-via-whatsapp>. [Accessed 7 May 2021].
- [2] Verizon, “Vzbot,” [Online]. Available: <https://www.verizon.com/vzbot/vzbotproxy/web?b=wav>. [Accessed 2 5 2021].
- [3] Lark Technologies, Inc., “lark.com,” [Online]. Available: <https://www.lark.com/> . [Accessed 7 May 2021].
- [4] Bank of America Corporation, “bankofamerica.com,” [Online]. Available: https://promo.bankofamerica.com/erica/#GetApp_GetTheApp. [Accessed 7 May 2021].
- [5] Ada Health GmbH, “ada.com,” [Online]. Available: <https://ada.com/es/>.
- [6] LG Electronics, “lg.com,” [Online]. Available: <https://www.lg.com/us/support/chatbot>. [Accessed 7 May 2021].
- [7] University of Arkansas for Medical Sciences, “COVID-19 News Updates,” [Online]. Available: <https://publichealth.uams.edu/news/covid-19-news-updates/>. [Accessed 27 04 2021].
- [8] B. Koopman, G. Zuccon, S. Chapman, Y. Dang and D. Lawrence, “How a Conversational Agent Might Help Farmers in the Field,” *ACM Reference Format*, 2020.
- [9] A. & K. M. & A. N. & N. R. Patil, “Comparative study of cloud platforms to develop a Chatbot.,” *International Journal of Engineering & Technology.*, vol. 6, no. 10.14419/ijet.v6i3.7628. , p. 57, (2017).
- [10] N. V. & R. S. G. A. Mesía Llique, «Desarrollo de un sistema basado en la tecnología CHATBOT para el control y monitoreo del cultivo de arroz en Chiclayo,» *Repositorio de la Universidad Privada del Norte.*, n° <http://hdl.handle.net/11537/14878>, 2018.
- [11] P. K. M. D. P. M. S. Akshay Kumar, “CHATBOT IN PYTHON,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 6, no. 11, p. 4, 2019.

- [12] S. Muñoz-Manzaneda, "TAUJA: Repositorio de Trabajos Académicos de la Universidad de Jaén," 25 junio 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10953.1/8444>. [Accessed 2021 5 17].
- [13] B. Arora, D. S. Chaudhary, M. Satsangi, M. Yadav, L. Singh and P. S. Sudhish, "Agribot: A Natural Language Generative Neural Networks Engine for Agricultural Applications," *2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications, IC3A 2020*, 2020.
- [14] D. Adiwardana, M. T. Luong, D. R. So, J. Hall, N. Fiedel, R. Thoppilan, Z. Yang, A. Kulshreshtha, G. Nemade, Y. Lu and Q. V. Le, "Towards a human-like open-domain chatbot," *arXiv*, 2020.
- [15] S. Roller, E. Dinan, N. Goyal, D. Ju, M. Williamson, Y. Liu, J. Xu, M. Ott, K. Shuster, E. M. Smith, Y. L. Boureau and J. Weston, "Recipes for building an open-domain chatbot," *arXiv*, 2020.
- [16] C. & S. H. Manning, *Foundations of Statistical Natural Language Processing*, Cambridge: MIT Press, 1999.
- [17] Kore, "Kore," [Online]. Available: <https://kore.ai/>. [Accessed 06 08 2021].
- [18] Chatfuel, "Chatfuel," [Online]. Available: <https://chatfuel.com/>.
- [19] Microsoft, "Microsoft Bot Framework," Microsoft, [Online]. Available: <https://dev.botframework.com/>. [Accessed 5 5 2021].
- [20] Microsoft, "Servicios de informática en la nube | Microsoft Azure," Microsoft, [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/>. [Accessed 06 08 2021].
- [21] Heroku, "Cloud Application Platform | Heroku," Heroku, [Online]. Available: <https://www.heroku.com/>. [Accessed 06 08 2021].
- [22] Amazon, "AWS | Lambda - Gestión de recursos informáticos," Amazon, [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/lambda/>. [Accessed 06 08 2021].
- [23] IBM, "Watson Assistant," IBM Watson, [Online]. Available: <https://watson-assistant-demo.ng.bluemix.net/>. [Accessed 27 04 2021].
- [24] G. H. & A. A. J. A. Aliaga Gálvez, "Aplicación móvil para diagnosticar posibles fallas automotrices utilizando la herramienta IBM Watson para la Empresa Vecars & Trucks S.A.C," *Repositorio Digital de la Universidad Privada Antenor Orrego*, no. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5162>, 2019.
- [25] IBM, "Watson Assistant Demo," IBM, [Online]. Available: <https://watson-assistant-demo.ng.bluemix.net/>. [Accessed 27 04 2021].
- [26] M. Jain, P. Kumar, I. Bhansali, Q. V. Liao, K. Truong and S. Patel, "FarmChat: A Conversational Agent to Answer Farmer Queries," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, vol. 2, no. 4, 2018.
- [27] Ministry of Agriculture, Government of India, "Kisaan Call Center," [Online]. Available: <https://data.gov.in/keywords/kcc>. [Accessed 6 May 2021].
- [28] S. P. a. H. D. P. a. S. M. Mohanty, "Using deep learning for image-based plant disease detection," *Frontiers in plant science*, vol. 7, p. 1419, 2016.
- [29] G. & C. L. & S. Í. & C. C. Mostaço, "AgronomoBot: a smart answering Chatbot applied to agricultural sensor networks," in *International conference on Precision Agriculture*, Motreal, Quebec, 2018.
- [30] K. P. J. Vijayalakshmi, "Agriculture TalkBot Using AI," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, no. 2s5, p. 4, 2019.
- [31] K. K, "AGROCHATBOT: Understanding the Scope of Agriculture," *International Journal of Advanced Research in Science & Technology (IJARST)*, vol. 7, no. 3, p. 6, 2020.
- [32] uni-tuebingen.de, "Backbone - Pedagogic Corpora for Content and Language Integrated Learning," [Online]. Available: <http://projects.ael.uni-tuebingen.de/backbone/moodle/>. [Accessed 6 May 2021].
- [33] K. & M. T. Park, "CSS10: A Collection of Single Speaker Speech Datasets for 10 Languages," *Interspeech*, 2019.
- [34] Gunther Cox, "chattebot-corpora," 6 Oct 2018. [Online]. Available: <https://github.com/gunthercox/chatterbot-corpora>. [Accessed 6 May 2021].
- [35] In Musapedia, the banana knowledge compedium, "Paginas en español | Improving the understanding of banana," 04 April 2021. [Online]. Available: <https://www.promusa.org/P%C3%A1ginas+en+espa%C3%B1ol>.
- [36] "pyTelegramBotAPI," GitHub, [Online]. Available: <https://github.com/eternnoir/pyTelegramBotAPI.git>. [Accessed 2021].
- [37] "plato-research-dialogue-system," GitHub, [Online]. Available: <https://github.com/uber-archive/plato-research-dialogue-system>. [Accessed 2021].

Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión

Effect of variable air flow on the energy efficiency of a centralized combustion air system

Secundino Marrero-Ramírez¹, Orlando Vega-Areas², Iliana Antonia González-Palau³

Fecha de recepción: 4 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 4 de febrero, 2023

Marrero-Ramírez, S; Vega-Areas, O; González-Palau, I.A. Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 19-30.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6295>

- 1 Universidad Técnica de Cotopaxi. Carrera Electricidad, Ecuador. Correo electrónico: secundino.marrero@utc.edu.ec
 <https://orcid.org/0000-0001-5161-545X>
- 2 Empresa metalúrgica Ernesto Guevara. Departamento Mantenimiento, Cuba. Correo electrónico: ovarias@ecg.moa.minem.cu
 <https://orcid.org/0000-0001-7483-6335>
- 3 Universidad Tecnológica Indoamerica. Ambato. Ecuador. Correo electrónico: palau.iliana@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-2057-7472>

Palabras clave

Flujo, ventiladores, control, eficiencia energética, motores.

Resumen

En la investigación se analiza como el control manual en el sistema de aire de combustión en hornos de una planta metalúrgica puede generar sobreconsumo de energía, al utilizar la estrangulación de un dámper con el uso de válvulas manipuladas para regular de forma manual el flujo de aire, donde los ventiladores centrífugos del sistema trabajan todo el tiempo a plena capacidad y esto produce pérdidas de energía eléctrica, debido a la dinámica operativa del sistema. La demanda del sistema es variable y su programarla resulta difícil, por ello se evaluó una alternativa que consiste en controlar el accionamiento de los ventiladores a través de variadores de velocidad con un lazo de control proporcional integral que permite establecer el flujo de aire a través de la medición no directa del flujo de aire, utilizando la variable presión para lograr una reducción de la demanda de potencia del 30 % con el sistema de control.

Keywords

Flow, fans, control, energy efficiency, motors.

Abstract

The research analyzes how manual control in the combustion air system in furnaces of a metallurgical plant can generate energy overconsumption, by using the throttling of a damper with the use of manipulated valves to manually regulate the air flow. Where the system's centrifugal fans work all the time at full capacity and this produces electrical energy losses, due to the system's operating dynamics. The demand of the system is variable and its programming is difficult, for this reason an alternative was evaluated that consists of controlling the activation of the fans through variable speed drives with an integral proportional control loop that allows establishing the air flow through non-direct measurement of airflow, using variable pressure to achieve a 30% reduction in power demand with the control system.

Introducción

El proceso de reducción de mineral laterítico en hornos de solera múltiples, es una de las etapas que define la eficiencia metalúrgica en las plantas productora de níquel de tecnología carbonato amoniacal. Aquí la etapa de reducción, libera los óxidos presentes en el mineral alimentado antes de pasar al proceso de lixiviación, donde se precipita el níquel y el cobalto. La planta objeto de estudio presenta un total de 24 hornos, agrupados en tres losas (líneas) donde se requiere un perfil óptimo de temperatura, que puede variar en función de la composición química del mineral y se establece con 10 cámaras de combustión en cada horno, las que en su mayoría trabajan con aireación del 60% por el doble propósito que ellas tienen de establecer el régimen térmico y aportar los agentes reductores H_2 y el CO [1].

El oxígeno de combustión requerido para las cámaras es obtenido en cada losa por 3 ventiladores centrífugos, de los cuales uno siempre se encuentra de reserva, con vista a garantizar en las 24 horas de operación el aire de combustión que se transporta por medio de un ducto colector. El objetivo del estudio es la eficiencia energética del sistema de suministro de aire que realiza el control manual de flujo por medio de un dámper, lo que incide en el consumo de energía de los motores asincrónicos que están acoplados a los ventiladores centrífugos que presentan un caudal de 61200 m³/h, altura de presión 15 kPa y 1709 rev/min. El sistema por lo general

necesita un ventilador a toda capacidad y un segundo ventilador que, de tener el flujo variable, se podría adaptar a las necesidades variables del sistema, ya que todas las cámaras y hornos no se encuentran trabajando en todo momento. Ello nos pone de manifiesto que la demanda de aire al ser variable, requiere de una programación que resulta compleja por el hecho de que la disminución del oxígeno por debajo de lo requerido en las cámaras, podría apagar las mismas y afectar el régimen térmico del horno [1].

La figura 1 muestra la curva característica de un ventilador [2], donde se puede apreciar que no es suficiente conocer el caudal que es capaz de suministrar este a descarga libre (posición a) sin obstrucciones, sino que resulta necesario saber qué caudal se proporciona según sean las distintas pérdidas de carga que este debe vencer, entre las cuales se encuentra el sistema de regulación utilizado para manejar el flujo de aire requerido. Aquí se observa la relación que existe entre las presiones estática (p_e), dinámica (p_d) y total (p_t) de la ecuación (1).

$$P_t = P_e + P_d \quad (1)$$

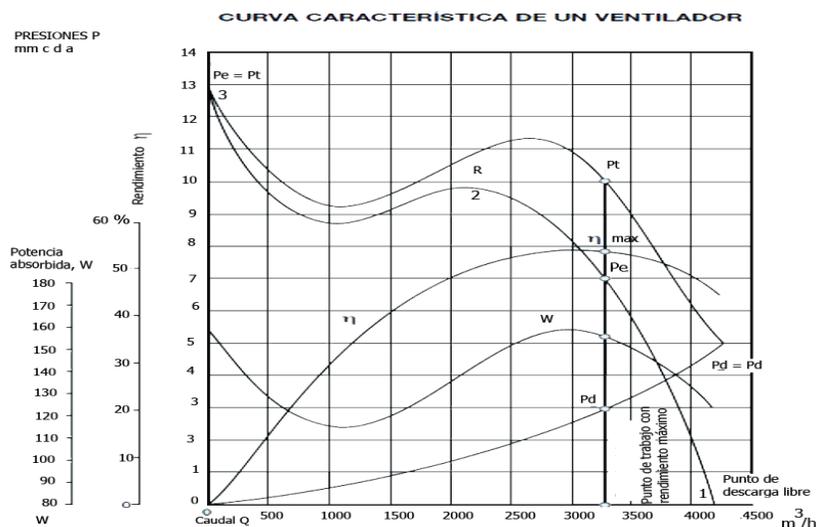


Figura 1. Curvas características de un ventilador. Fuente: [2].

La zona de trabajo idónea de un ventilador se muestra en el tramo 1-2 de la figura 1, mientras que en el intervalo 2-3 su funcionamiento es inestable, el rendimiento desciende de forma rápida y aumenta notablemente el ruido.

La regulación de los ventiladores, principalmente se efectúa mediante el uso de compuertas, By-pass, regulación de velocidad y variación del ángulo del alabe. Seleccionar uno u otro de estos sistemas depende de los criterios de ahorro energético, costo de la inversión, zona de regulación requerida y ruido, entre otros. La regulación con el dámper incide significativamente en la curva de eficiencia del sistema al incrementar la resistencia al flujo de aire y la curva de presión puede ser obtenida con la expresión (2):

$$P = K(FAD)^2 \quad (2)$$

Donde P es la presión requerida para producir un flujo dado en el sistema, K función del sistema que representa la resistencia al flujo de aire y FAD el flujo de aire deseado. En la figura 2 se ilustran las curvas del sistema para distintas posiciones de un dámper a la entrada [3], donde la presión requerida se reduce gradualmente conforme el flujo de aire disminuye y la diferencia que se observa en el gráfico, se puede asociar a la energía desperdiciada.

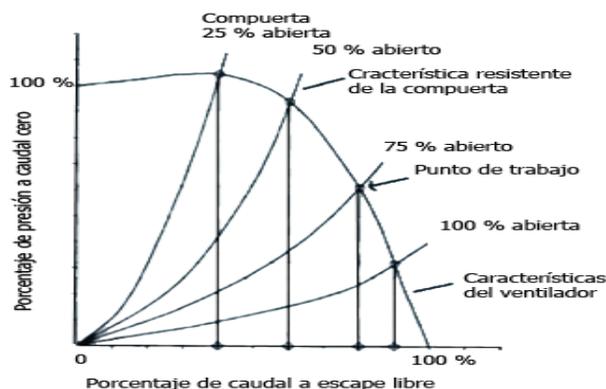


Figura 2. Curvas del sistema para diferentes posiciones de la compuerta. Fuente: [3].

En el análisis del consumo energético de un ventilador centrífugo atendiendo a los distintos métodos de control de flujo de aire, se pone de manifiesto que para el 80% del flujo de aire, se requiere el 97 % de la potencia cuando es utilizado un control de amortiguación y el 80% cuando se utilizan álabes; mientras que al utilizar variador de velocidad se consume alrededor de un 53% [3, 4]. Esta pérdida energética se manifiesta en forma de transferencia de energía mecánica del fluido o energía térmica y puede ser determinada con las expresiones de pérdidas de presión y potencia (3) y (4) respectivamente.

$$P_{CS} = Q_f \Delta_p \quad (3)$$

$$P_{ECS} = Q \Delta_{pCS} / \eta_v \quad (4)$$

En donde P_{CS} es la potencia, P_{ECS} potencia de pérdidas, Q_f caudal de aire, η_v rendimiento y Δ_{pCS} la variación de presión. Al seleccionar uno u otro método de regulación también se debe considerar el coste de la dinámica de la demanda de aire que presenta el sistema. En [5] se analizan los diferentes tipos de regulación más usados y las zonas de trabajo recomendadas para cada uno de los sistemas mencionados. Aquí se observa que la regulación de velocidad, posee la ventaja de permitir una mayor zona de regulación, es por ello que en la actualidad el uso de variadores de velocidad, es una de las vías más utilizadas para reducir el consumo de energía eléctrica en el accionamiento de ventiladores en aplicaciones de flujo de aire variable. En [4] se analiza la potencia en un ventilador centrífugo con el uso del convertidor de frecuencia (figura 3), donde se reduce la demanda de potencia en un 30 % con la variación de velocidad de n_1 a n_2 , para disminuir el flujo de aire en un 10 %.

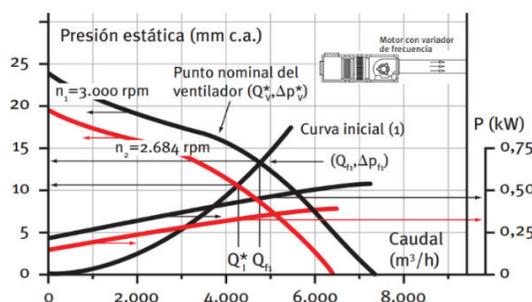


Figura 3. Variación de presión y demanda de potencia con el uso de variador. Fuente: [4].

En el trabajo realizado por [6] se muestra un sistema de monitoreo y control de combustión a través del análisis óptico de la llama en un horno industrial que logra importantes resultados experimentales desde la correlación entre la temperatura calculada a partir del espectro de la llama y la medida en el refractario, donde se aplica un algoritmo de optimización basado en el gradiente conjugado, utilizando la velocidad del ventilador como parámetro a controlar para el incremento de la temperatura en el 10% y la aplicación del variador de frecuencia para la reducción del consumo de energía eléctrica del motor del ventilador.

Materiales y métodos

Los sistemas de combustión en muchos de los procesos industriales representan un núcleo importante en donde el control convencional del comportamiento de la llama a través de la medición de la composición del residuo de gases liberados, presenta un retraso inevitable en el transporte debido a la distancia entre la llama y la muestra de medición [6], lo que adicionalmente presenta otra dificultad asociada al retardo intrínseco en el sensor y ello limita la acción de control con esta variable. En el estudio de un ventilador se considera el diámetro de la hélice, la velocidad de rotación, las presiones, el flujo volumétrico, densidad del gas, potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro. Las expresiones para determinar el flujo de aire, presión y potencia se dan a continuación [4, 5].

$$Q_v = Q_{v0} \frac{n}{n_0} \left(\frac{D}{D_0} \right)^3 \quad (5)$$

$$p_r = p_{ro} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (6)$$

$$P_v = P_{v0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{D}{D_0} \right)^5 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (7)$$

Dónde Q_v es el flujo volumétrico que mueve el ventilador, p_r presión en el ventilador, P_v potencia que demanda el ventilador, D diámetro de la hélice, ρ densidad del aire y n velocidad del ventilador. A partir de las ecuaciones anteriores es posible determinar la potencia y el flujo de aire a diferencias presiones [7], es así como podemos decir que una pequeña reducción en la velocidad producirá una reducción significativa en el uso de energía, ya que el consumo de energía de un ventilador sigue una "ley cúbica", lo que significa que, al disminuir la velocidad a un 80% del valor máximo, el consumo de energía se reduce aproximadamente en un 50%. El rendimiento (η) del ventilador se define como el cociente entre la potencia que entrega el ventilador al aire (P_{ota}) dividida por la potencia que el ventilador recibe en su eje (P_{otv}), ambas son expresadas a través de la presión total (P_{Total}), el flujo de aire (Q) y la potencia que se consume como se muestra en la ecuación (8):

$$\eta_v = \frac{P_{ota}}{P_{otv}} = \frac{P_{Total} * Q}{P_v} \quad (8)$$

La potencia entregada al aire (P_{ota}) por el ventilador depende del caudal que circula, la presión necesaria para vencer las pérdidas que establece el sistema de conductos y se determina a través de la ecuación (9)

$$P_{ota} = Q h_{TV} g \quad (9)$$

Donde Q es caudal de aire, h_{TV} altura de presión total a entregar por el ventilador y g aceleración de la gravedad. La modelación del sistema de transporte de aire en [8] emplea el método de los volúmenes finitos para evaluar el comportamiento del termofluido dinámico del aire en un sistema de distribución. Donde el sistema de ecuaciones obtenido es el resultado de la aplicación un modelo de turbulencia $k-\epsilon$, el modelo RNG $k-\epsilon$ (renormalización con la teoría de grupo) y el modelo de las tensiones de Reynolds. Esta modelo presenta resultados de interés a considerar durante la modelación de sistemas de transporte de aire. Mientras que en [9] un algoritmo de control para ventiladores auxiliares y extractores en un circuito de ventilación forzada, mejora la velocidad de licuado de los gases presentes en las explotaciones de la minería subterránea para reducir el riesgo generado por los gases, aquí son utilizados diferentes algoritmos de control para el ventilador; como es el caso del controlador de muerte súbita y el control por asignación de polos, utilizando un algoritmo de estimación de parámetros por el método de mínimos cuadrados. Se mejora la eficiencia energética de circuito de ventilación al implementar la estrategia VSD (variable speed drive).

Determinación de parámetros de explotación del sistema

Para evaluar el objeto de estudio a través de la simulación, se realizaron experimentos para identificar el comportamiento de las variables del sistema en diferentes regímenes de operación del sistema, utilizando la información del sistema Scada (CITEC) instalado en la planta, que registra los consumos de energía de los ventiladores. En el trabajo [10] se plantea la regulación de la velocidad en los ventiladores centrífugos con variadores de velocidad, utilizando la presión para controlar el flujo de aire que llega a la red sin establecer el intervalo de trabajo requerido de esta variable, ni los puntos donde se deben realizar las mediciones en la red para poder sintonizar el variador y establecer la relación presión/flujo. Esto limita la propuesta del control automático cuando la demanda de aire no permanece constante en la red que está compuesta por un conjunto de ramales y válvulas [11]. Entonces el análisis de mejoras al sistema, requiere una forma eficiente del control de flujo de aire para la flexibilidad en el manejo del sistema, facilidad de mantenimiento y ahorro en el consumo de energía, a pesar de la complejidad que esto representa en sistema centralizado y ello se consigue con la tecnología VSD. Para evaluar la factibilidad del control de velocidad y el algoritmo de regulación es factible el uso del software MATLAB.

Estudio de caso

En la regulación manual del sistema, las compuertas hacen que el aire tenga un movimiento en más de una dirección y esto genera remolinos que no siempre se desplazan en la misma dirección de los álabes del ventilador, afectando la eficiencia del sistema compuerta-ventilador. Para el abastecimiento del aire en las cámaras combustión de la planta, existen 9 motores asincrónicos trifásicos de inducción con las características del cuadro 1 que forman tres grupos de turbo-máquinas para alimentar las tres líneas de producción.

Cuadro 1. Características de los motores.

Características de los motores del accionamiento						
Tipo de motor	Pn; [kW]	Un, V]	In [A]	Conexión	N; r.p.m	F.P
3AFP315M-4	220	440	359	Δ	1775	0.87

La curva característica del ventilador muestra gráficamente las presiones estáticas, que representan las pérdidas de carga totales, dinámicas y el rendimiento mecánico [5], donde esta característica indica la capacidad ventilador en función de la presión que se le exige. Para

definir el punto de trabajo del ventilador es necesario tener la característica de la red de tuberías y seleccionar el valor de la presión del flujo requerido para poder fijar el punto de trabajo del sistema. En la figura 4 se muestra la variabilidad promedio mensual en la operación de las cámaras de combustión durante un año en una línea, comportamiento que al ser analizado durante el día también muestra variaciones de demanda que no se pueden corregir de forma instantánea, ello pone de manifiesto que la demanda de aire a cubrir por los ventiladores es variable al existir un intervalo de 60 a 80 cámaras funcionando por lo general y la regulación manual requiere experticia y no exento del error humano.

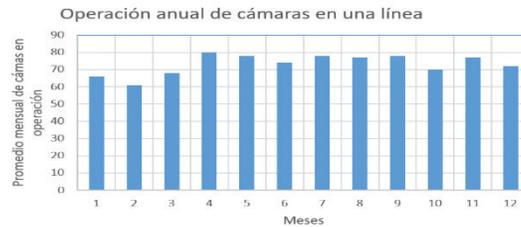


Figura 4. Comportamiento anual de las cámaras de combustión operando.

Análisis del uso de variador de velocidad para el control del flujo de aire.

En la elaboración de la característica resistente del sistema se consideran las pérdidas de carga originadas en el sistema, estas varían proporcionalmente al cuadrado del caudal de aire en los ductos. Por ello en la evaluación del punto de trabajo de un ventilador es necesario disponer de las curvas características del ventilador. [12, 13]. Para definir el flujo de aire del ventilador estudiado en relación al punto de trabajo teórico recomendado, se analizaron las mediciones realizadas por [14] en el colector principal de la planta para los casos en que trabajan 3 y 2 ventiladores en una losa, sin variar el estado de las válvulas de la red, comprobándose la curva experimental para un ventilador que se muestra en la figura 5, donde se considera el punto de operación recomendado de 8.5 m³/s con una presión de 15.8 kPa para obtener el comportamiento de la presión.

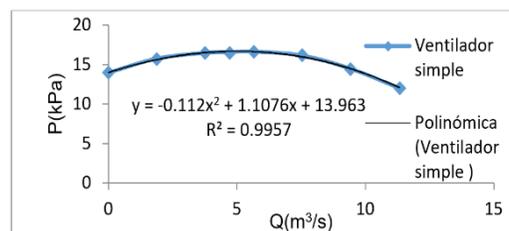


Figura 5. Curva característica de un ventilador del sistema.

Para establecer la relación entre presión, flujo de aire y potencia del sistema, se realizaron mediciones en diferentes puntos de la red y así determinar las presiones de trabajo que permiten el buen funcionamiento de las cámaras de combustión, acorde con el balance de oxígeno requerido en los quemadores de combustión. Se utilizó un medidor de presión SIEMENS, modelo SITRANS con lectura digital y rango de medición de 1 a 2.56 mbar para el registro de las caídas de presión que permitieron realizar el balance de energía de Bernoulli desde la salida, para la operación de uno y dos ventiladores, hasta la entrada de las cámaras de combustión de los hornos [14]. En el análisis del punto de operación se consideraron las

curvas del ventilador-red de la figura 6, que fueron verificadas en el sistema con diferentes pruebas en la operación de dos y tres ventiladores para realizar ajustes en el sistema y definir los parámetros de operación asociados con la presión de la red con el caudal de aire necesario.

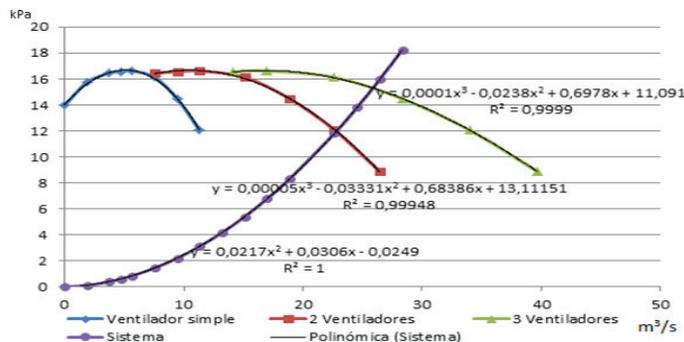


Figura 6. Curva característica de los ventiladores acoplados al sistema.

Entonces, si utilizamos unas de las curvas características del ventilador (PHE-1525/100-100s) instalado en la planta para definir el punto de trabajo en uno de los ventiladores del sistema, se observa que en el régimen nominal para un ventilador trabajando con la regulación del dámper, se entrega un flujo de aire que está en el orden de los 8.5 m³/s, lo que equivale a una demanda de potencia de entrada del ventilador de 180 kW. Si tenemos en cuenta que el balance del flujo teórico total de aire requerido cuando funcionan todas las cámaras en una losa [14], es de aproximadamente 50752,64 m³/h (14.1 m³/s) a una presión de 12.06 kPa y la capacidad máxima de dos ventiladores es de 81540 m³/h (22,65 m³/s), entonces podemos deducir, que el dámper debe regularse para entregar el 62.2% de la capacidad total, manteniendo la demanda de potencia cercana a la nominal, debido al tipo de regulación existente. Por ello se evaluó la regulación del ventilador por el método de la variación de velocidad para determinar las reservas de consumo de energía existente en función de la demanda de potencia requerida. También fue necesario evaluar la relación existente entre el flujo de aire y la potencia de consumo durante la operación de dos y tres ventiladores, donde se consideró el rango de trabajo actual del sistema y se pone de manifiesto una relación lineal entre estas variables que favorecen el uso del control planteado [11] al lograrse un estadístico R 0.9. En necesario señalar que los experimentos se realizaron en condiciones de producción de la planta y por ello no era admitido realizar cambios muy significativos alejados del punto de operación que afectarían la producción.

En las mediciones del consumo de energía de los ventiladores se aprecia que el valor promedio requerido de potencia de un ventilador está en el intervalo de 165 kW a 180 kW para su trabajo en régimen continuo, esto nos permite conocer la energía promedio desperdiciada en un día de funcionamiento que podría ser reducida considerablemente con el cambio en el sistema de control, si tenemos en cuenta que dos ventiladores se encuentran trabajando por 24 horas al día durante casi todo el año.

Se debe señalar que las reservas de energía en el sistema pueden ser superiores, si se optimiza el flujo requerido por el sistema a través de un algoritmo de pronóstico basado en minería de datos que permita establecer la demanda de aire con el resultado de la medición del flujo en tiempo real, usando la presión como variable de salida para establecer el flujo requerido [14].

Se utilizan los datos de [14] para poder establecer los modelos dinámicos del sistema y conocer la función de transferencia para relacionar potencia de consumo y la presión en el ducto. Se utilizó el Identi de software Matlab, donde se obtuvo la función de transferencia de primer orden que se muestra en la ecuación (10) para un ajuste (FIT) de 90 %.

$$G1 = \frac{0.04}{1 + 0.0015S} \quad (10)$$

De igual manera para poder establecer la viabilidad del control de flujo desde la medición de presión se graficaron ambas variables en la figura 7 (a) y a partir de estos datos se estableció la función de transferencia que relaciona el caudal y la presión en el ducto para la operación de los dos ventiladores. La función fue obtenida con un ajuste de 78.54 % que para fines de control es aceptable y se muestra en la en figura 7 (b), donde se realiza la comparación de la presión de salida con los datos y los valores obtenidos en el modelo de la función de transferencia de la ecuación 11.

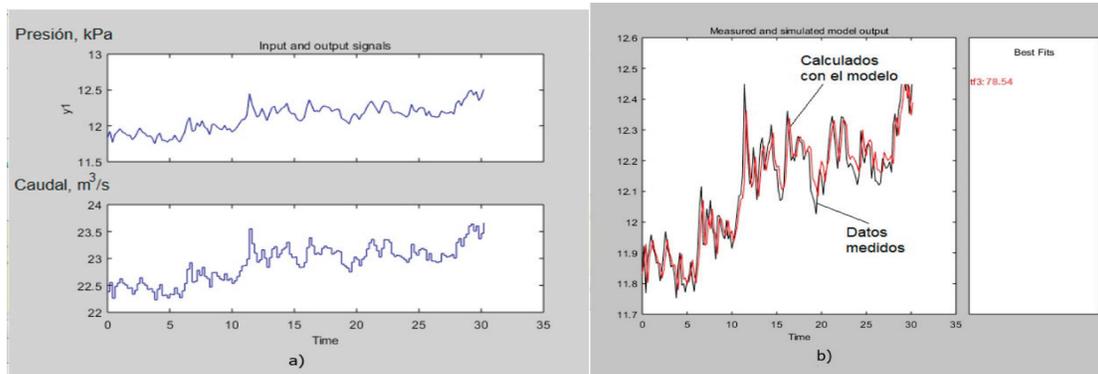


Figura 7. Mediciones de caudal y presión durante la operación de dos ventiladores (a) y comparación del ajuste del modelo con la data de medición de presión (b).

$$G2 = \frac{537.3S^2 + 434.1S + 165.3}{S^3 + 1292S^2 + 1061S + 312.1} \quad (11)$$

También se realizó una simulación para evaluar el lazo de control, utilizando el esquema mostrado en la figura 8, donde el ajuste de la velocidad requerida se realiza mediante un variador de control directo par - flujo (DTC) con un regulador proporcional integral derivativo (PID) para establecer las diferentes demandas de flujo de aire. En el sistema de control se consideran los estudios realizados por [12], donde se determinaron las características de la red para hallar el punto de trabajo de los ventiladores y se hace un análisis de la efectividad que tiene el uso de algoritmos de regulación para controlar un ventilador centrífugo con variador de velocidad, donde se muestra la viabilidad en la regulación con un controlador PID atendiendo a perturbaciones asociadas a variaciones en el torque.

Las variaciones en la densidad del aire, debidas a cambios de temperatura, presión atmosférica y humedad, son pequeñas y no se consideran en la simulación. Mientras que la relación presión/ flujo es utilizada en las diferentes velocidades para la tarea del controlador.

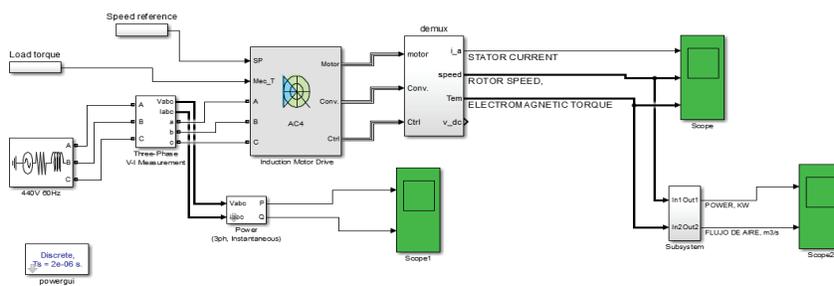


Figura 8. Simulación del accionamiento motor – ventilador con variador de velocidad.

Como se puede apreciar en la figura 9, durante la simulación se reduce la velocidad en 50%, 60% y 70 % y se obtienen reducciones de potencia en 55%, 46% y 37 % respectivamente. Se consideran dos valores de variación del torque de carga como perturbación para verificar el desempeño del controlador (figuras 9 y 10).

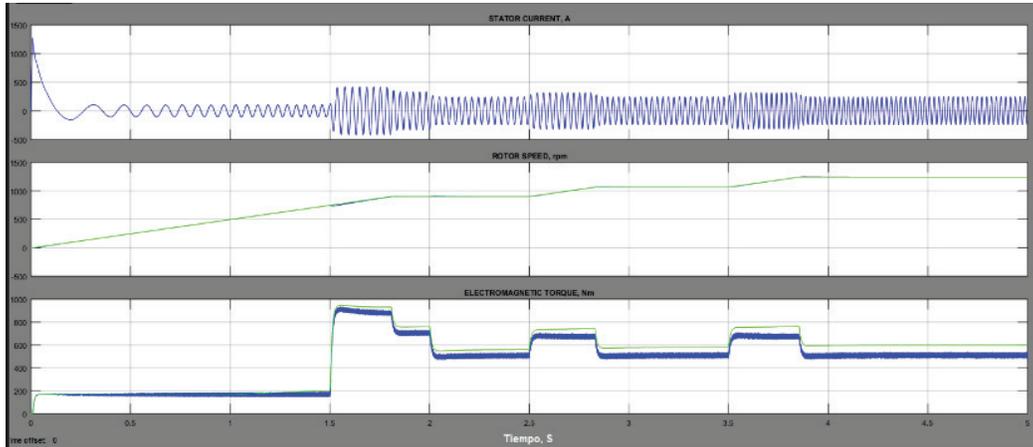


Figura 9. Variaciones de la velocidad y torque en el sistema.

Los resultados de la variación de flujo de aire son mostrados en la figura 10, donde se observa el comportamiento del sistema cuando la reducción del flujo de aire es del 53 %, lo que disminuye la potencia del sistema en un 46% con un tiempo de asentamiento y un error estacionario favorable. Para seleccionar los criterios de simulación se han considerado los resultados de [11, 16, 17].

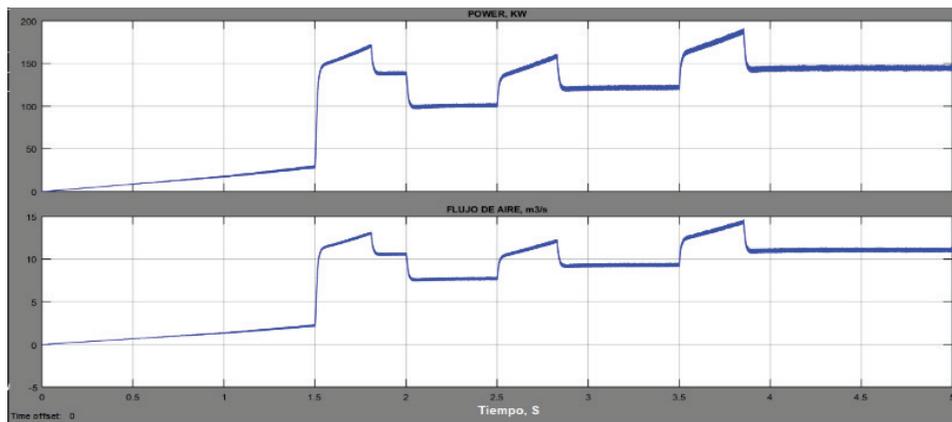


Figura 10. Variaciones de potencia y el flujo de aire con el uso de variador de velocidad.

Resultados

Al evaluar la reserva de energía se verifican los resultados ya obtenidos en un banco de prueba experimental por [10, 18, 19]. En la simulación del sistema de control con el controlador PID, se estabiliza el flujo de aire en función de la demanda, con valores despreciables de sobre impulso en presencia de variaciones del torque como perturbación del 10% de incremento. Como se quiere considerar la presión para la variable de control, aquí se han establecido variaciones a través del torque equivalente y esto es posible debido a la relación existente entre estos parámetros, siempre que no varíe el estado de apertura de las válvulas y demás accesorios

de la red que podrían conllevar a variaciones en el sistema. La simulación nos muestra que podemos fijar los valores de velocidad del ventilador en función de la demanda de flujo del aire con vista a incrementar la eficiencia energética de este sistema para reducir las pérdidas de energía en valores superiores al 30 %, esto coincide con los resultados obtenidos en los trabajos [19, 20] en relación al control de flujo y el empleo del convertidor de frecuencia para el control en cargas cuadráticas, esto produce un importante ahorro de energía con valores máximos que pueden llegar al 60 % [21].

El lazo de control puede suplir las dificultades del control manual, al poder variar en línea la velocidad requerida del ventilador atendiendo a los hornos y cámaras que están operativos en cada momento, la productividad que se fija en estos y la operación del control de temperatura en las cámaras.

Conclusiones

Debido al régimen de trabajo de la planta con una dinámica variable en el funcionamiento de las cámaras de combustión y los hornos, se justifica el control automático para establecer la relación flujo de aire/presión requerida y lograr el uso racional de la energía en los ventiladores.

En el sistema actual de regulación del flujo de aire en la planta se presentan reservas de energía en valores superiores al 20% en relación al uso de un variador de velocidad para establecer el flujo de aire requerido. El uso del controlador PID para regular el flujo de aire con la relación flujo/presión existente a la salida en del ducto colector del sistema, puede ser utilizada para reducir el consumo de energía en el accionamiento de los ventiladores. El uso de técnicas heurística en el pronóstico de demanda podría representar una oportunidad más de mejora en el sistema

Referencias

- [1] A. Rojas, M. Magaña, A. Riverón. "Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación". Revista de Metalurgia, vol. 55, no 3, pp. 149, 2019. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>
- [2] S & P. "Ventiladores". [En línea]. Disponible en: <https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6641/79352.pdf>, [Último acceso 2022].
- [3] Rockwell Automation Chile. "Cómo lograr eficiencia de operación y energía con variadores de velocidad". [En línea]. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2305&ni=como-lograr-eficiencia-de-operacion-y-energia-con-variadores-de-velocidad>. [Último acceso 2022].
- [4] Guía técnica. "Selección de equipos de transporte de fluidos". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España: IDEA, 2012
- [5] S. Escoda S.A. "Manual Práctico de Ventilación". (2010). España: S&P, [En línea]. Disponible en: <https://www.salvadorescoda.com/tecnico/VE/Manual-Ventilacion.pdf>
- [6] H. Garcés et al., "Modeling optical variables in combustion processes by Hammerstein-Wiener systems", in IEEE ICA/ACCA2021, Chile, pp. 1–6, March 2021.
- [7] "El ahorro de energía en bombas y ventiladores". InfoPLC. Net, 2012 [En línea]. Disponible en: <https://www.infoplcn.net/documentacion/21-motion-control-motores/1569-el-ahorro-de-energia-en-bombas-y-ventiladores>. [Último acceso: 2022].
- [8] C. Rodríguez et al., "Análisis numérico del comportamiento del aire en un sistema de distribución de aire acondicionado empleando los modelos de turbulencia k-f, rng k-f y el modelo de las tensiones de Reynolds". Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 16, no. 2, pp. 370-382, 2008.
- [9] M. Nova, R. Moreno. "Diseño y construcción de un prototipo para el estudio de estrategias de control aplicadas a la ventilación en la minería subterránea". Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, 2015.
- [10] M. Pilatásig et al., Evaluación Energética en Motores de Inducción en el Accionamiento de Ventiladores Centrífugos. Revista Técnica "Energía", vol. 11, no1, pp. 85-91, 2015.

- [11] E. Santana et al., Propuesta de control eficiente del aire de combustión en una planta de hornos de reducción. Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, vol. 1, no 15, pp. 43-52, 2016
- [12] Prior Industries Australia PTY LTD. "Energy solutions: Curves". (2008). Sydney, Australia. [En línea]. Disponible en: www.priorindustries.com. [Último acceso: 2022].
- [13] Nicotra Gebhardt S. A. (2020). "Ventiladores Centrífugos", Waldenburg, Alemania. Edición I. [En línea] Disponible en: <https://www.nicotra-gebhardt.com/de/>
- [14] O. Vega. "Evaluación de los parámetros operacionales del suministro de aire de combustión en los Hornos de Reducción". Trabajo de fin de Maestría. Dpto. Eléctrica, Universidad de Moa, Holguín, 2015.
- [15] L. Peñalba, J. Pardo. Gestión Energética de los motores eléctricos: Mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad," AEDIE, España, pp. 8, 2005. [En línea]. <http://aedie.org/9CHLIE-paper-send/237-mantilla.pdf>
- [16] L. Flórez. Simulación por software de las curvas generadas en ventilación mecánica por control de presión. Rev. Umbral Científico, no 9, pp. 85-96, 2006
- [17] González J. et al. "Modelo numérico para estudio del flujo en un ventilador centrífugo de pequeñas dimensiones", presentado en XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Dpto. Energía. Universidad de Oviedo, España, Nov. 3-5, 2010, pp. 5-10
- [18] A. Lencinas. "Control de velocidad V/HZ bidireccional de un motor de inducción monofásico utilizando MC68HC908MR32", en XXII Congreso Argentino de Control Automática, AADECA, Buenos Aires, Argentina, Sep. 1-2, 2010.
- [19] G. Bosch et al., "Programador Lógico para control de potencia. I Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa" (SIIO 2018), Universidad de Palermo, Argentina, 2018, pp. 175-187.
- [20] E. Santana et al. The Applied Artificial Intelligence to the Control Electronics Improving the Energy Efficiency of Ventilation Systems in the Industry. Journal BJSTR, vol. 25, no 5, pp. 19527- 19536, 2020.
- [21] D. Montero, O. Vega, E. Santana. "Modelación del sistema de ventilación en hornos de reducción para mejorar la eficiencia energética en la industria del níquel", en III Congreso MANTENERG. Habana, Cuba, Jun. 18-22, 2018.

Efecto de dos porcentajes de drenaje y de un bioestimulante en pepino (*Cucumis sativus*) producido bajo invernadero

Effect of two drainage rates and a biostimulant in cucumber (*Cucumis sativus*) grown under greenhouse conditions

Julio César Loáiciga-Arias¹,
José Eladio Monge-Pérez², Michelle Loría-Coto³

Fecha de recepción: 5 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 18 de febrero, 2023

Loáiciga-Arias, J.C; Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Efecto de dos porcentajes de drenaje y de un bioestimulante en pepino (*Cucumis sativus*) producido bajo invernadero. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 31-44.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6298>

- 1 Coordinación Regional de Agricultura Orgánica, Dirección de Desarrollo Chorotega, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica. Correo electrónico: julioaloaicigaa@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-1055-9874>.
- 2 Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mongeperez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>
- 3 Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Cambio climático; calidad; rendimiento; extracto de algas; fracción de lavado; bioestimulante.

Resumen

Se evaluó el efecto de la aplicación de dos porcentajes de drenaje (10 % y 30 %) y de un bioestimulante (vía foliar, vía radicular, y testigo) sobre el rendimiento y la calidad del pepino cv. Modan cultivado bajo invernadero. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm), número de frutos por planta, peso del fruto (g), rendimiento (ton/ha), y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix). En comparación con las plantas que tuvieron un 30 % de drenaje, las plantas con un 10 % de drenaje presentaron únicamente las siguientes diferencias significativas: una menor altura, un menor diámetro de tallo, y un mayor rendimiento de segunda calidad. La aplicación foliar del bioestimulante produjo un aumento significativo en las siguientes variables, en comparación con la aplicación radicular y el testigo: número de frutos por planta (comercial y primera calidad), y rendimiento (total, comercial y de primera calidad). La aplicación radicular del bioestimulante provocó un mayor peso del fruto de tercera calidad, en comparación con la aplicación foliar, pero no fue diferente del testigo. La aplicación foliar del bioestimulante mejoró el rendimiento y la calidad del pepino, por lo que se recomienda su uso, bajo las condiciones en que se realizó el estudio. Se recomienda el uso de un drenaje del 10 % en pepino cultivado en invernadero, dado que produjo un rendimiento y calidad similar al obtenido con 30 %, pero representa una economía importante de agua y nutrientes.

Keywords

Climate change; quality; yield; seaweed extract; leaching fraction; biostimulant.

Abstract

Researchers evaluated the effect of applying two drainage rates (10 % and 30 %) and a biostimulant (foliar, root, and control treatments) on the yield and quality of cucumber cv. Modan grown under greenhouse conditions. Evaluated variables were: plant height (cm), stem diameter (mm), number of fruits per plant, fruit weight (g), yield (ton/ha), and percentage of total soluble solids (°Brix). Compared to plants with 30 % drainage rate, plants with a 10% rate showed only the following significant differences: lower height, smaller stem diameter, and higher second quality yield. The foliar application of biostimulant produced a significant increase in the following variables, compared to the root application and the control: number of fruits per plant (commercial and first quality), and yield (total, commercial and first quality). The root application of biostimulant caused a higher weight of the third quality fruit, compared to the foliar application, but it was not different from the control. The foliar application of biostimulant improved the yield and quality of cucumber, for which its use is recommended under the conditions in which the study was carried out. The use of a 10 % drainage rate is also recommended in greenhouse-grown cucumber, as it produced similar yields and quality to those obtained with a 30 % rate, thus representing an important economy of water and nutrients.

Introducción

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una planta anual, herbácea, de crecimiento rastrero e indeterminado, perteneciente a la familia Cucurbitaceae, y originaria de las regiones tropicales de Asia; este cultivo tiene un alto índice de consumo, tanto en fresco como industrializado [1].

Los bioestimulantes a base de extractos de algas marinas están entre los más modernos y sostenibles promotores del crecimiento vegetal, y se caracterizan por ser biodegradables e inofensivos, lo que los hace compuestos ambientalmente amigables que no provocan residuos tóxicos [2]. Entre las sustancias que contienen estos extractos se encuentran minerales, polisacáridos, reguladores del crecimiento, ácidos grasos poliinsaturados, lípidos, proteínas, antioxidantes y colorantes; los fertilizantes líquidos a partir de algas marinas pueden aumentar el contenido de clorofila y el rendimiento total, y mejorar el sistema radical de muchas plantas, además de que protegen contra enfermedades y los efectos del estrés abiótico, por lo que se han usado para estimular el crecimiento y aumentar la productividad en muchos cultivos, tales como el pepino [3] [4] [5] [2]. Una de las algas marinas más utilizadas en agricultura es *Ascophyllum nodosum*, cuyos extractos poseen componentes inorgánicos tales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, hierro, magnesio, zinc, sodio y azufre [3].

Los extractos de algas modifican el metabolismo celular, debido a la inducción de la síntesis de moléculas antioxidantes que pueden mejorar el crecimiento vegetal y la resistencia de las plantas al estrés [6]. Se ha informado que la aplicación de extractos de algas provocó un aumento en el rendimiento en papa, pepino y repollo chino, así como en el contenido de sólidos solubles totales en fresa; además, el extracto del alga *A. nodosum* provocó el aumento del tamaño del fruto en el cultivo de pimiento [6].

En el cultivo de pepino, la aplicación de extractos de *A. nodosum* mejora la tolerancia a enfermedades como *Alternaria cucumerinum*, *Didymella applanata*, *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Phytophthora melonis*, *Erysiphe polygoni*, *E. necator* y *Sphaerotheca fuliginea* [7] [8].

Los extractos líquidos de algas se pueden aplicar al suelo, cerca de la raíz de la planta, mezclado con el agua de riego y aplicado como riego por goteo, o también se pueden aplicar como aspersión foliar, que es la forma más común, en una amplia variedad de hortalizas, frutas y flores [3] [4]. La eficacia de los extractos de algas depende de la fase de crecimiento de la planta en la que se aplique; el mejor momento es cuando la planta está en crecimiento vegetativo, antes del inicio de la floración, con el fin de estimular el cuajado y maduración del fruto [3] [4].

En sistemas de producción de hortalizas en ambiente protegido se maneja un sistema de riego con drenaje, es decir, que cuando se aportan riegos con la solución nutritiva, generalmente se deja drenar un 20-30 % del volumen total aplicado [9] [10] [11]; este porcentaje de drenaje permite aportar la cantidad de agua y nutrientes que la planta requiere para su óptimo crecimiento y desarrollo, además que permite el lavado de sales que se acumulan en el sustrato. Otros autores recomiendan que el porcentaje de drenaje sea entre 20 y 40 % del volumen de solución nutritiva aportado [12], mientras que otros investigadores indican que un porcentaje de drenaje de 30-35% es necesario para evitar la salinización del sustrato [13].

La proporción de drenaje necesaria depende de factores como el ritmo de transpiración del cultivo o la calidad del agua, y se utiliza normalmente como indicador o diagnóstico del adecuado fertirriego; desde un punto de vista práctico, es razonable pensar entre un 10 % y 30 %, en función de la época del año, el estado de desarrollo de las plantas, y la calidad del agua de riego [10].

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de dos porcentajes de drenaje y de la aplicación de un bioestimulante, sobre el rendimiento y calidad de pepino cultivado bajo condiciones de invernadero.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), de la Universidad de Costa Rica, ubicada en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, situada a 10° 1' latitud Norte y 84° 16' longitud Oeste, a una altitud de 883 msnm, con un promedio de precipitación anual de 1940 mm, y un promedio anual de temperatura de 22 °C.

El ensayo se llevó a cabo en un invernadero modelo XR de la marca Richel (Francia), tipo multicapilla, con techo de plástico, con ventilación cenital automática, y con un sistema de riego por goteo para proporcionar a las plantas el suministro de agua y nutrientes. Se utilizó la metodología de manejo integrado de plagas descrito por otros autores [14].

Se utilizó el genotipo de pepino (*Cucumis sativus* L.) partenocárpico Modan F-1. El trasplante se realizó el 19 de julio de 2015, cuando las plántulas tenían al menos una hoja verdadera. El cultivo se estableció en sacos plásticos rellenos con fibra de coco como sustrato, con una longitud de 1 m de largo, 20 cm de ancho, y 15 cm de altura. La distancia entre hileras fue de 1,54 m y la distancia entre plantas de 25 cm, para una densidad de 2,60 plantas/m². Se eliminaron todos los brotes secundarios, y se dejó solo el tallo principal. Cuando fue necesario se realizó amarre y tutoreo de las plantas.

Se evaluaron seis tratamientos (cuadro 1). Se utilizaron dos formas de aplicación del bioestimulante: vía foliar, y vía radicular (aplicada al sustrato), y además se incluyó un testigo, al cual no se le realizaron aplicaciones del bioestimulante; se usó el bioestimulante Algamix®, el cual es preparado con extractos del alga marina *Ascophyllum nodosum* [15]. Los tratamientos de porcentaje de drenaje consistieron en un aporte considerado como óptimo (30 %) y un aporte considerado como deficitario (10 %).

Cuadro 1. Tratamientos evaluados.

Número	Tratamiento		Dosis
	Aplicación de bioestimulante	Drenaje	
1	Foliar	10 %	350 ml/ha
2	Radicular	10 %	3,5 l/ha
3	Sin aplicación (Testigo)	10 %	n.a.
4	Foliar	30 %	350 ml/ha
5	Radicular	30 %	3,5 l/ha
6	Sin aplicación (Testigo)	30 %	n.a.

Los niveles de humedad del sustrato se controlaron con el programador de riego Igrow modelo 1400, por medio de radiación acumulada. Se colocaron dos estaciones de monitoreo para medir el volumen de agua dispensada al saco y el volumen total de agua drenada del saco, y de esta forma calcular y ajustar el porcentaje de drenaje respectivo; estas mediciones se realizaron diariamente.

Desde la siembra hasta los 14 días después del trasplante (ddt), el cultivo se manejó con niveles óptimos de riego; los diferentes tratamientos se aplicaron a partir de los 15 ddt, y se extendieron hasta el fin del ciclo del cultivo. La frecuencia de aplicación del bioestimulante fue de cada 14 días.

Se utilizó un sistema de fertirriego automatizado, con una solución nutritiva validada para la producción de pepino en ambiente protegido (cuadro 2).

Cuadro 2. Programa de fertirrigación utilizado.

Edad del cultivo	Concentración del nutriente (mg/l)											
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	Mo	B
0-14 ddt	150	53	240	165	40	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,09	0,8
15-30 ddt	161	53	265	175	50	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,09	0,8
>30 ddt	172,5	53	290	175	55	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,09	0,8

Nota: ddt = días después del trasplante.

La cosecha inició el 17 de agosto de 2015 (29 ddt), y se realizó una vez a la semana, hasta el 2 de noviembre de 2015 (106 ddt), recolectando los frutos que mostraban color verde oscuro, y cuya base y ápice tenían el mismo grosor. Los frutos se clasificaron en categorías de calidad (cuadro 3).

Cuadro 3. Categorías de calidad del pepino.

Característica	Categoría de calidad			
	Primera	Segunda	Tercera	Rechazo
Longitud del fruto (cm)	Mayor a 20	Entre 16 y 20	Entre 12 y 15,9	Cualquiera
Deformaciones	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Presentes
Daños	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Presentes

Las variables evaluadas fueron:

- Número de frutos por planta:** se determinó el número de frutos por planta para cada categoría de calidad, realizando una sumatoria de los frutos obtenidos en todas las cosechas, y luego se dividió entre el número de plantas por parcela.
- Peso promedio del fruto (g):** se determinó realizando una sumatoria del peso de todos los frutos registrados durante todas las cosechas, y luego se dividió entre el número de frutos totales; esta variable se determinó para cada categoría de calidad; se usó una balanza electrónica marca Ocony, modelo TH-I-EK, de 5000,0 ± 0,1 g de capacidad.
- Rendimiento por hectárea (ton/ha):** se calculó a partir del peso de los frutos cosechados y de la densidad de siembra, para cada categoría de calidad. El rendimiento comercial se calculó sumando el peso de la producción de las categorías de primera, segunda y tercera calidad; el rendimiento total se obtuvo sumando el peso obtenido para todas las categorías de calidad.
- Altura de planta (cm):** al finalizar el ciclo del cultivo se midió la altura de la planta, desde el cuello de la planta hasta el ápice de la misma; se utilizó una cinta métrica de 8 m de longitud marca Assist. Se evaluaron 6 plantas por repetición.
- Diámetro de tallo (mm):** se midió esta variable en la base del tallo; las evaluaciones se realizaron al finalizar el ciclo del cultivo, y se utilizó un calibrador digital marca Mitutoyo, modelo CD-6" CS, con una capacidad de 154,5±0,1 mm. Se evaluaron 6 plantas por repetición.

- 6. Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix):** se tomó un fruto por repetición, al cual se le midió esta variable con la ayuda de un refractómetro manual marca BOECO, con una capacidad de $0-32,0 \pm 0,2$ °Brix.

Se registraron los datos de temperatura y humedad relativa (HR) que prevalecieron dentro del invernadero durante la ejecución del experimento, mediante sensores y un registrador de datos marca Onset, modelo HOBO U30. Asimismo, se evaluó diariamente el valor de pH y conductividad eléctrica (CE), tanto de la solución nutritiva que salía del gotero, como de la solución de drenaje para ambos tratamientos (10 % y 30 %).

Cada unidad experimental constó de dos sacos (8 plantas), de las cuales se consideraron las dos plantas de los extremos como bordes para reducir el efecto de la deriva durante las aplicaciones foliares del bioestimulante sobre la parcela útil (6 plantas).

Se utilizó un diseño irrestricto al azar, con un arreglo factorial con dos factores, los cuales correspondían a dos porcentajes de drenaje, y dos formas de aplicación del bioestimulante más un testigo, para un total de seis tratamientos y cuatro repeticiones.

Para todas las variables se realizó un análisis estadístico de varianza, y se utilizó la prueba LSD Fisher con una significancia de 5 % para confirmar o descartar diferencias entre tratamientos.

Resultados y discusión

Durante el período en que se desarrolló el ensayo, la temperatura diurna promedio dentro del invernadero se ubicó en $27,1$ °C (con extremos máximos de $33,4$ °C), y la temperatura nocturna promedio fue de $21,4$ °C (con extremos mínimos de $19,8$ °C). La HR diurna promedio fue de $72,3$ % (con extremos mínimos de $52,3$ %), y la HR nocturna promedio fue de $89,2$ % (con extremos máximos de $94,2$ %).

La temperatura ideal para el desarrollo del cultivo de pepino es de $20-25$ °C, con máximas y mínimas tolerables de 34 °C y 15 °C, respectivamente, y en el caso de la HR, el valor ideal es de $60-70$ % [16]; estos valores ideales de temperatura y HR fueron superados en las condiciones del invernadero de la EEAFBM, por lo que se pudo haber producido estrés abiótico en el cultivo.

A lo largo del ensayo, el valor promedio de pH del gotero fue de $6,0$, mientras que del drenaje de 30 % fue de $6,5$, y del drenaje de 10 % fue de $6,7$. Por otra parte, el valor promedio de CE del gotero fue de $2,50$ dS/m, y fue de $3,50$ dS/m para el drenaje de 30 %, y de $4,30$ dS/m para el drenaje de 10 %; lógicamente, la CE fue mayor con 10 % de drenaje, en relación con el uso de 30 % de drenaje, debido a una mayor salinidad del sustrato.

Según varios autores, la conductividad eléctrica óptima para el cultivo de pepino es entre $2,2$ y $2,7$ dS/m; además, este cultivo no tolera el estrés salino, y su rendimiento baja hasta un 10 % con una conductividad eléctrica de $3,3$ dS/m [17].

En el cuadro 4 se presentan los resultados de las variables altura de planta y diámetro de tallo. Con respecto al factor drenaje, los mayores valores para ambas variables se obtuvieron con 30 % de drenaje. El tratamiento Testigo con 30 % de drenaje obtuvo plantas con una mayor altura, en comparación al tratamiento de aplicación radicular con 10 % de drenaje. En relación al diámetro del tallo, todos los tratamientos con 30 % de drenaje tuvieron un valor superior, con respecto al Testigo con 10 % de drenaje.

En otra investigación en invernadero, se halló que la altura de planta del híbrido Modan fue de 288 cm, hasta los 60 ddt [18]; en el presente ensayo se obtuvo un mayor valor para esta variable, debido a que las evaluaciones se extendieron por un período más extenso.

En otro ensayo, la aplicación foliar de un extracto de algas produjo plantas con la misma altura que el testigo [2]; este mismo resultado se obtuvo en el presente trabajo, tanto con 10 % de drenaje como con 30 %.

Cuadro 4. Altura de planta y diámetro de tallo en pepino.

Efecto	Tratamiento	Variable	
		Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)
Factor Drenaje	10 %	659 a	11,37 a
	30 %	762 b	12,16 b
Bioestimulante x Drenaje			
Foliar	10 %	704 ab	11,47 ab
Radicular	10 %	617 a	11,45 ab
Testigo	10 %	656 ab	11,19 a
Foliar	30 %	760 ab	12,15 bc
Radicular	30 %	734 ab	12,12 bc
Testigo	30 %	794 b	12,22 c

Nota: Datos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba LSD Fisher.

Otros investigadores encontraron que la aplicación foliar de extractos de algas produjo plantas con una altura mayor que el testigo [19] [20].

En otro ensayo se evaluaron dos extractos de algas en pepino en invernadero en aplicación foliar; uno de ellos produjo una mayor altura de planta en comparación con el testigo, pero el otro extracto obtuvo la misma altura que el testigo [21].

En una investigación en pepino, con aplicaciones foliares de dos extractos de algas, se halló que con la dosis menor la altura de la planta fue similar al testigo, pero con las dos dosis mayores la altura fue superior al testigo [22].

En el cuadro 5 se presentan los datos obtenidos para el número de frutos por planta. Se hallaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del factor de aplicación de bioestimulante, para las categorías de primera calidad, comercial y rechazo; el tratamiento foliar obtuvo una mayor cantidad de frutos comerciales y de primera calidad con respecto a los otros tratamientos, y una menor cantidad de frutos de calidad de rechazo, en comparación al testigo. En el caso del factor drenaje, no se hallaron diferencias significativas para ninguna de las categorías de calidad. La interacción bioestimulante x drenaje no fue estadísticamente significativa para ninguna de las calidades.

En otra investigación en invernadero, se halló que el número total de frutos cosechados por planta para el híbrido Modan fue de 8,44 hasta los 60 ddt [18]. Otros autores obtuvieron un total de 15,0 frutos por planta para este híbrido [23], y en otro ensayo se obtuvo una producción total entre 16,4 y 17,4 frutos por planta, según la densidad de siembra [24]. Otros autores hallaron para este híbrido en el invernadero de la EEAFBM un total de 31,60 frutos por planta, hasta los 97 ddt en época lluviosa [25], y 22,04 frutos por planta hasta los 94 ddt en la época seca [26]; los resultados obtenidos en el presente trabajo se ubican entre los informados en estas dos últimas investigaciones.

Cuadro 5. Número de frutos por planta, según categoría de calidad.

Efecto	Tratamiento	Número de frutos por planta, según calidad					
		Total	Comercial	Primera	Segunda	Tercera	Rechazo
B	Foliar	27,67 a	25,57 b	16,23 b	5,71 a	3,62 a	2,10 a
	Radicular	25,02 a	22,08 a	13,73 a	4,75 a	3,60 a	2,94 ab
	Testigo	26,00 a	22,00 a	14,04 a	4,67 a	3,29 a	4,00 b
D	10 %	26,69 a	23,67 a	14,61 a	5,46 a	3,60 a	3,03 a
	30 %	25,76 a	22,76 a	14,72 a	4,63 a	3,42 a	3,00 a
Interacción B x D		ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bioestimulante x Drenaje							
Foliar	10 %	26,34 ab	24,63 ab	14,96 ab	5,88 b	ns	1,71 a
Radicular	10 %	25,83 ab	22,92 ab	14,12 a	5,21 ab	ns	2,92 abc
Testigo	10 %	27,92 ab	23,46 ab	14,75 a	5,29 ab	ns	4,46 c
Foliar	30 %	29,00 b	26,50 b	17,50 b	5,54 ab	ns	2,50 ab
Radicular	30 %	24,21 a	21,25 a	13,33 a	4,29 ab	ns	2,96 abc
Testigo	30 %	24,08 a	20,54 a	13,33 a	4,05 a	ns	3,54 bc

Nota: B: bioestimulante; D: drenaje. Datos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba LSD Fisher.; ns = no significativa.

Otros investigadores encontraron que la aplicación foliar de extractos de algas produjo un mayor número de frutos por planta que el testigo [19]; esto mismo sucedió en el presente trabajo para el número de frutos por planta de calidades primera y comercial.

En otro ensayo, la aplicación foliar de extractos de algas en pepino produjo la misma cantidad de frutos por planta que en el testigo [20], y lo mismo sucedió en otro trabajo con la aplicación radicular de extracto de algas [27]. En este mismo sentido, en el cultivo de melón en invernadero, la aplicación de Algamix® vía radicular produjo un número de frutos por planta estadísticamente similar al testigo [28].

En otros estudios con extractos de algas aplicados vía foliar en pepino en invernadero, el número de frutos por planta fue superior o igual al testigo, según el tipo de extracto [21], la dosis utilizada [29] [22], y la variedad de pepino [6].

Unos autores probaron dos porcentajes de drenaje (17% y 29%) en pepino hidropónico en invernadero; el número de frutos por planta fue mayor en las plantas que recibieron 29% de drenaje [30]; en forma contraria, en el presente trabajo no se hallaron diferencias entre 10 % y 30 % de drenaje, para esta variable.

En el cuadro 6 se presentan los datos de peso promedio del fruto. Solamente se hallaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del factor de aplicación de bioestimulante, para la categoría de tercera calidad; el tratamiento radicular obtuvo un mayor peso promedio del fruto de tercera calidad, en comparación con el tratamiento foliar, pero no fue diferente del valor obtenido por el tratamiento testigo. En el caso del factor drenaje, no se hallaron diferencias significativas para ninguna de las categorías de calidad. La interacción bioestimulante x drenaje no fue estadísticamente significativa para ninguna de las categorías de calidad.

Cuadro 6. Peso promedio del fruto, según categoría de calidad.

Efecto	Tratamiento	Peso promedio del fruto (g), según calidad					
		Total	Comercial	Primera	Segunda	Tercera	Rechazo
B	Foliar	336,75 a	353,01 a	404,01 a	278,71 a	233,61 a	149,71 a
	Radicular	328,00 a	346,90 a	387,22 a	298,62 a	263,90 b	176,05 a
	Testigo	320,14 a	349,22 a	393,93 a	285,59 a	246,99 ab	158,07 a
D	10 %	329,72 a	349,25 a	395,51 a	289,37 a	249,95 a	177,76 a
	30 %	326,87 a	350,17 a	394,60 a	285,91 a	246,38 a	144,79 a
Interacción B x D		ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bioestimulante x Drenaje							
Foliar	10 %	ns	ns	391,03 ab	287,15 ab	238,63 a	168,19 ab
Radicular	10 %	ns	ns	397,62 ab	291,98 ab	272,73 b	211,60 b
Testigo	10 %	ns	ns	397,88 ab	288,98 ab	238,51 a	153,50 ab
Foliar	30 %	ns	ns	416,99 b	270,27 a	228,60 a	131,23 a
Radicular	30 %	ns	ns	376,83 a	305,27 b	255,06 ab	140,50 a
Testigo	30 %	ns	ns	389,98 ab	282,19 ab	255,48 ab	162,64 ab

Nota: B: bioestimulante; D: drenaje. Datos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba LSD Fisher.; ns = no significativa.

En otra investigación en invernadero, se halló que el peso del fruto para el híbrido Modan fue de 342,60 g [18], y en otro ensayo se obtuvo para este híbrido un peso promedio de 372-388 g, según la densidad de siembra [24]. Otros autores hallaron para este híbrido en el invernadero de la EEAFBM un peso del fruto de 254,52 g en época lluviosa [25], y de 304,51 g en la época seca [26]. Otros investigadores reportaron para el genotipo Modan un peso promedio del fruto de 328 g [23]; los valores hallados en el presente estudio se acercan a los obtenidos por estos últimos investigadores.

Varios investigadores evaluaron extractos de algas en pepino en invernadero, en aplicación foliar, y hallaron que las plantas que recibieron los extractos produjeron frutos con un peso similar al testigo [29] [21] [31], y lo mismo sucedió en otro ensayo con la aplicación radicular de extracto de algas [27]; en el presente trabajo se hallaron resultados similares. En este mismo sentido, en el cultivo de melón en invernadero, la aplicación de Algamix® vía radicular produjo un peso del fruto estadísticamente similar al testigo [28].

En otros ensayos, la aplicación foliar de extractos de algas en pepino, produjo frutos con un peso superior o igual al testigo, según la dosis del extracto [22] [20], el tipo de extracto y la variedad de pepino [6].

En el cuadro 7 se presenta el rendimiento obtenido en el ensayo. Se hallaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del factor de aplicación de bioestimulante, para las categorías de calidad de primera, comercial, total y rechazo; el tratamiento foliar obtuvo un mayor rendimiento total, comercial y de primera calidad, y un menor rendimiento de rechazo, con respecto a los otros tratamientos. En el caso del factor drenaje, solamente se hallaron diferencias significativas para la categoría de segunda calidad; el tratamiento de 10 % obtuvo un mayor rendimiento de segunda calidad, en comparación con el tratamiento de 30 %. La interacción bioestimulante x drenaje fue estadísticamente significativa para el rendimiento total, comercial y de primera calidad.

Cuadro 7. Rendimiento por hectárea, según categoría de calidad.

Efecto	Tratamiento	Rendimiento hasta los 106 ddt (ton/ha), según calidad					
		Total	Comercial	Primera	Segunda	Tercera	Rechazo
B	Foliar	241,24 b	233,47 b	170,36 b	41,09 a	22,02 a	7,77 a
	Radicular	212,66 a	198,85 a	138,35 a	36,43 a	24,07 a	13,81 b
	Testigo	216,35 a	200,08 a	144,23 a	34,80 a	21,06 a	16,27 b
D	10 %	228,26 a	214,82 a	150,56 a	41,04 b	23,22 a	13,45 a
	30 %	218,57 a	206,78 a	151,40 a	33,84 a	21,54 a	11,79 a
Interacción B x D		*	*	*	ns	ns	ns
Bioestimulante x Drenaje							
Foliar	10 %	226,83 ab	219,60 bc	152,09 a	44,05 b	ns	7,24 a
Radicular	10 %	226,10 ab	210,72 ab	146,36 a	39,30 ab	ns	15,38 bc
Testigo	10 %	231,86 ab	214,13 ab	153,22 a	39,76 ab	ns	17,73 c
Foliar	30 %	255,64 b	247,34 c	188,63 b	38,13 ab	ns	8,31 ab
Radicular	30 %	199,22 a	186,98 ab	130,34 a	33,55 ab	ns	12,24 abc
Testigo	30 %	200,84 a	186,03 a	135,23 a	29,83 a	ns	14,82 abc

Nota: B: bioestimulante; D: drenaje. Datos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba LSD Fisher.; * = significativa ($p \leq 0,05$); ns = no significativa.

En otra investigación en invernadero, se halló que el rendimiento del híbrido Modan hasta los 60 ddt fue de 48,26 ton/ha [18]. Otros autores obtuvieron para este híbrido un rendimiento entre 147 y 177 ton/ha, según la densidad de siembra [24], y otros investigadores reportaron para el genotipo Modan un rendimiento de 158 ton/ha [23]. Otros autores hallaron para este híbrido en el invernadero de la EEAFBM un rendimiento total de 175,30 ton/ha hasta los 94 ddt en la época seca [26], y de 211,30 ton/ha hasta los 97 ddt en época lluviosa [25]; los resultados obtenidos en el presente trabajo son similares a los hallados por estos últimos autores.

Varios investigadores han informado que la aplicación foliar de extractos de algas (*A. nodosum* y otras) produjo un mayor rendimiento en pepino, en comparación con el testigo [8] [2]; en la presente investigación se encontró un resultado similar para el rendimiento total, comercial y de primera calidad; esto se podría explicar por el efecto benéfico del extracto de *A. nodosum*, el cual ayudó a la planta a superar las consecuencias negativas del estrés abiótico.

En otros ensayos en pepino, se obtuvo el mismo rendimiento entre las plantas que recibieron la aplicación foliar de extractos de algas y el testigo [20] [31], y lo mismo sucedió en otro ensayo con la aplicación radicular de extracto de algas [27]. En este mismo sentido, en el cultivo de melón en invernadero, la aplicación de Algamix® vía radicular produjo un rendimiento total y un rendimiento comercial estadísticamente similares al testigo [28].

En otros ensayos, la aplicación foliar de extractos de algas en pepino en invernadero han producido un rendimiento superior o similar al testigo, según el tipo de extracto [21], la dosis usada [29] [22], el año de evaluación [19], y la variedad de pepino [6].

Según [4], la respuesta de las plantas a la aplicación de extractos de algas depende del material biológico (planta y alga), condiciones de crecimiento, métodos de cultivo, la dosis utilizada, la forma de aplicación, y los momentos de aplicación de los extractos.

Unos autores evaluaron dos porcentajes de drenaje (17% y 29%) en pepino hidropónico en invernadero; el rendimiento total fue mayor en las plantas que recibieron 29% de drenaje [30]; en forma contraria, en el presente trabajo no hubo diferencias en el rendimiento total entre 10 % y 30 % de drenaje.

Otros investigadores ensayaron con porcentajes de drenaje de 15 % y 30 % en pepino hidropónico, y no hallaron diferencias en el rendimiento total entre ambos tratamientos [32]; en el presente trabajo se obtuvo un resultado similar, entre 10 % y 30 % de drenaje.

Dado que en este trabajo no se hallaron diferencias en el rendimiento total y comercial entre 10 % y 30 % de drenaje, es preferible el uso de 10 % de drenaje, pues representa una opción interesante ante el cambio climático, tanto a nivel económico como ambiental, dado el ahorro en agua y nutrientes que involucra. Este resultado también demuestra que la mayor salinidad del sustrato que se obtuvo con el tratamiento de 10 % de drenaje, en comparación con el uso de 30 % de drenaje, no causó un efecto perjudicial al cultivo, lo que podría indicar que el híbrido Modan presenta algún grado de tolerancia a la salinidad.

Por otra parte, otro resultado interesante de destacar es la interacción significativa entre bioestimulante y drenaje para el rendimiento de primera calidad; el tratamiento 30 % de drenaje con aplicación foliar obtuvo un rendimiento superior a los otros cinco tratamientos para esta categoría de calidad.

En el cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos para el porcentaje de sólidos solubles totales. No se hallaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del factor de aplicación de bioestimulante, ni tampoco entre los tratamientos del factor drenaje. La interacción bioestimulante x drenaje no fue estadísticamente significativa.

Cuadro 8. Porcentaje de sólidos solubles totales del fruto.

Efecto	Tratamiento	Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)
B	Foliar	3,16 a
	Radicular	3,61 a
	Testigo	3,03 a
D	10 %	3,33 a
	30 %	3,20 a
Interacción B x D		ns
Bioestimulante x Drenaje		
Foliar	10 %	ns
Radicular	10 %	ns
Testigo	10 %	ns
Foliar	30 %	ns
Radicular	30 %	ns
Testigo	30 %	ns

Nota: B: bioestimulante; D: drenaje. Datos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba LSD Fisher.; ns = no significativa.

En otra investigación en invernadero, se halló que el porcentaje de sólidos solubles totales del híbrido Modan fue de 3,60 °Brix [18]. Otros investigadores obtuvieron para esta variable entre 3,0 y 3,7 °Brix, según la densidad de siembra, en pepino Modan [24]. Otros autores hallaron

para este híbrido en el invernadero de la EEAFBM un porcentaje de sólidos solubles totales de 2,89 °Brix en época lluviosa [25], y 3,40 °Brix en la época seca [26]; los resultados obtenidos en el presente ensayo se acercan a los hallados por estos últimos autores.

Unos investigadores evaluaron dos extractos de algas en pepino en invernadero en aplicación foliar; las plantas que recibieron los extractos produjeron frutos con un porcentaje de sólidos solubles totales similar al testigo [21] [20]; en el presente trabajo se obtuvieron resultados similares.

En el cultivo de melón en invernadero, la aplicación de Algamix® vía radicular produjo un porcentaje de sólidos solubles totales estadísticamente similar al testigo [28]; este mismo resultado se halló en la presente investigación.

Conclusiones y recomendaciones

En comparación con las plantas que tuvieron un 30 % de drenaje, las plantas con un 10 % de drenaje presentaron únicamente las siguientes diferencias significativas: una menor altura, un menor diámetro de tallo, y un mayor rendimiento de segunda calidad.

La aplicación foliar del bioestimulante produjo un aumento significativo en las siguientes variables, en comparación con la aplicación radicular y el testigo: número de frutos por planta (comercial y primera calidad), y rendimiento (total, comercial y de primera calidad).

La aplicación radicular del bioestimulante provocó un mayor peso del fruto de tercera calidad, en comparación con la aplicación foliar, pero no fue diferente del testigo.

La aplicación foliar del bioestimulante mejoró el rendimiento y la calidad del pepino, por lo que se recomienda su uso, bajo las condiciones en que se realizó el estudio.

Se recomienda el uso de un drenaje del 10 % en pepino cultivado en invernadero, dado que produjo un rendimiento y calidad similar al obtenido con 30 %, pero representa una economía importante de agua y nutrientes.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica y de CONARE, para la realización de este trabajo. Asimismo, agradecen la colaboración de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés.

Referencias

- [1] V. K. Kapuriya, K. D. Ameta, S. K. Teli, A. Chittora, S. Gathala and S. Yadav, "Effect of spacing and training on growth and yield of polyhouse grown cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, no. 8, pp. 299-304, 2017.
- [2] S. M. Hassan, M. Ashour, N. Sakai, L. Zhang, H. A. Hassanien, A. Gaber and G. A. G. Amarr, "Impact of seaweed liquid extract biostimulant on growth, yield, and chemical composition of cucumber (*Cucumis sativus*)," *Agriculture*, vol. 11, no. 320, pp. 1-16, 2021.
- [3] D. Battacharyya, M. Z. Babgohari, P. Rathor and B. Prithiviraj, "Seaweed extracts as biostimulants in horticulture," *Scientia Horticulturae*, vol. 196, pp. 39-48, 2015.
- [4] A. Pohl, A. Kalisz and A. Sekara, "Seaweed extracts' multifactorial action: influence on physiological and biochemical status of Solanaceae plants," *Acta Agrobotanica*, vol. 72, no. 1, p. 1758, 2019.
- [5] A. A. Espinosa-Antón, R. M. Hernández-Herrera and M. González, "Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas," *Bioteología Vegetal*, vol. 20, no. 4, pp. 257-282, 2020.

- [6] T. Z. Sarhan and S. F. Ismael, "Effect of low temperature and seaweed extracts on flowering and yield of two cucumber cultivars (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Agricultural and Food Research*, vol. 3, no. 1, pp. 41-54, 2014.
- [7] P. P. Shukla, E. G. Mantin, M. Adil, S. Bajpai, A. T. Critchley and B. Prithiviraj, "Ascophyllum nodosum-based biostimulants: sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management," *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, no. 655, pp. 1-22, 2019.
- [8] O. Ali, A. Ramsubhag and J. Jayaraman, "Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: implications towards sustainable crop production," *Plants*, vol. 10, no. 531, pp. 1-27, 2021.
- [9] C. Baixauli and J. Aguilar, *Cultivo sin suelo de hortalizas*, Valencia, España: Textos Imatges S. A., 2002, p. 59.
- [10] M. Urrestarazu, *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*, Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 2015, p. 267.
- [11] R. G. Snyder, "Guía del cultivo de tomate en invernaderos," 2016.
- [12] F. Giuffrida, S. Argento, V. Lipari and C. Leonardi, "Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation," *Acta Horticulturae*, vol. 614, pp. 799-803, 2003.
- [13] A. Pardossi, F. Malorgio, L. Incrocci, G. Carmassi, R. Maggini, D. Massa and F. Tognoni, "Simplified models for the water relations of soilless cultures: what they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture," *Acta Horticulturae*, vol. 718, pp. 1-10, 2006.
- [14] E. Elizondo-Cabalca and J. E. Monge-Pérez, "Pimiento (*Capsicum annuum*) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables," *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 17, no. 2, pp. 33-60, 2019.
- [15] Lida Plant Research, "Algamix: plant biostimulant," 2022. [Online]. Available: <https://www.lidaplantresearch.com/bioestimulantes-vegetales/algamix/>.
- [16] N. Mora, H. Campos, J. Fallas, S. Morales, M. Blanco and J. Alfaro, "Caracterización de la agrocadena pepino holandés," Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, 2007.
- [17] F. Galindo, M. Fortis, P. Preciado, R. Trejo, M. Segura and J. Orozco, "Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo sistema protegido," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 5, no. 78, pp. 1219-1232, 2014.
- [18] C. Ramírez-Vargas, "Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico," *Tecnología en Marcha*, vol. 32, no. 1, pp. 107-117, 2019.
- [19] Y. M. Ahmed and E. A. Shalaby, "Effect of different seaweed extracts and compost on vegetative growth, yield and fruit quality of cucumber," *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, vol. 4, no. 3, pp. 235-240, 2012.
- [20] E. F. Hasan and A. A. Hussein, "Effect of soil coverage with organic mulching and spraying with seaweed extract on some vegetative and productive traits of cucumber grown in greenhouses," *Diyala Agricultural Sciences Journal*, vol. 12, pp. 206-220, 2020.
- [21] T. Z. Sarhan, S. T. Ali and S. M. S. Rasheed, "Effect of bread yeast application and seaweed extract on cucumber (*Cucumis sativus* L.) plant growth, yield and fruit quality," *Mesopotamia Journal of Agriculture*, vol. 39, no. 2, pp. 26-34, 2011.
- [22] K. T. Pico, "Fertilización foliar a base de algas marinas en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en época lluviosa en la zona de Quevedo," Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador, 2017.
- [23] J. López-Elías, J. C. Rodríguez, M. A. Huez, S. Garza, J. Jiménez and E. I. Leyva, "Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda," *IDESIA*, vol. 29, no. 2, pp. 21-27, 2011.
- [24] J. López-Elías, S. Garza, M. A. Huez, J. Jiménez and E. O. Rueda, "Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero," *European Scientific Journal*, vol. 11, no. 24, pp. 25-36, 2015.
- [25] J. A. Cruz-Coronado and J. E. Monge-Pérez, "Producción de siete genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivados en ambiente protegido," *Tecnología en Marcha*, vol. 33, no. 2, pp. 102-118, 2020.
- [26] K. Chacón-Padilla and J. E. Monge-Pérez, "Rendimiento y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado bajo invernadero," *Revista Pensamiento Actual*, vol. 17, no. 29, pp. 39-50, 2017.
- [27] A. Macedo, "Evaluación de cinco genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) con dos bioestimulantes en hidroponía," División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, 2004.

- [28] T. Alvarado-Sánchez and J. E. Monge-Pérez, "Efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y la calidad de melón (*Cucumis melo* L.) bajo cultivo protegido en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 4, pp. 15-25, 2015.
- [29] J. C. Ascencio, "Comparativo de tres fuentes y niveles de bioestimulantes vegetales en la producción de pepinillo (*Cucumis sativus* L.) manejado orgánicamente en Tingo María," Departamento Académico de Ciencias Agrarias, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú, 2008.
- [30] M. K. Schon and M. P. Compton, "Comparison of cucumbers grown in rockwool or perlite at two leaching fractions," *HortTechnology*, vol. 7, no. 1, pp. 30-33, 1997.
- [31] S. Zamora, J. L. Loa, F. A. Beltrán, J. G. Loya, F. H. Ruiz and A. Palacios, "Extrato de algas como biofertilizante na qualidade de pepino (*Cucumis sativus*)," *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, vol. 4, no. 3, pp. 3771-3776, 2021.
- [32] S. Hikosaka, M. Hohjo, T. Maruo, Y. Shinohara and T. Ito, "Effects of leaching rate and renewal of nutrient solution on cucumber growth in recirculating hydroponics using organic medium," *Environmental Control in Biology*, vol. 40, no. 2, pp. 187-194, 2002.

Breve mirada técnica a 12 años de diseño y construcción de Vivienda de Interés Social: Caso de las auditorías de calidad del CFIA

Brief technical look on 12 years of design
and construction of Social Interest Housing:
Case study of CFIA's quality audits

Erick Mata-Abdelnour¹

Fecha de recepción: 27 de agosto, 2022
Fecha de aprobación: 12 de enero, 2023

Mata-Abdelnour, E. Breve mirada técnica a 12 años de diseño y construcción de vivienda de interés social: caso de las auditorías de calidad del cfia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 45-58.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.5978>

¹ Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Costa Rica.
Correo electrónico: erick.mata.a@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8592-0671>

Palabras clave

Calidad; auditoría técnica; sistema constructivo; sistema electromecánico; vivienda subsidiada.

Resumen

Para la investigación asociada a este artículo se revisaron los informes de las auditorías de calidad llevadas a cabo por el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA) durante el periodo del año 2006 al 2018. Se extrajeron las variables más importantes que reflejan el cumplimiento de criterios de calidad técnica de las viviendas, para observar el comportamiento de estas a través del tiempo. Por medio de la comparación de series históricas, se analizan y definen tendencias de los principales aspectos estructurales, arquitectónicos, eléctricos, mecánicos y urbanísticos fundamentales del diseño en de la construcción de las viviendas de interés social. Estas se agrupan entre aspectos positivos que se han mantenido, aquellos que han mejorado y los aspectos problemáticos que aún existen. Finalmente se brindan recomendaciones sobre posibles pasos que podría tomar el Sistema Financiero Nacional para la Vivienda con el fin de promover acciones de mejora.

Keywords

Quality; technical audit; construction system; electromechanical system; subsidized housing.

Abstract

For the research associated with this article, the reports of the quality audits carried out by the Federated College of Engineers and Architects of Costa Rica (CFIA), during the period from 2006 to 2018, were reviewed. The most important variables that reflect the fulfillment of technical quality criteria of the houses were extracted to observe the behavior of these over time. Through the comparison of historical series, trends are analyzed and defined in the main structural, architectural, electrical, mechanical and urban aspects fundamental to the design and construction of social housing and are grouped into the positive aspects that have been maintained, those that have improved and problematic aspects that still exist. Finally, recommendations are provided on possible next steps that the National Financial System for Housing could take in order to promote improvement actions.

Introducción

El caso costarricense de política de vivienda ha sido uno de los más exitosos en América Latina, ya que cuenta con uno de los déficits de vivienda cuantitativos más bajos de la región (BID, 2012).



Figura 1. Déficit habitacional porcentual para diversos países en América Latina. Fuente: [10].

El Sistema Financiero Nacional para la Vivienda (SFNV) ha sido un actor predominante en el accionar de la política de vivienda costarricense, pues luego de varias décadas de llevar a cabo esfuerzos dispersos y heterogéneos en calidad en la producción de vivienda, en 1986 con la Ley 7052 de creación del SFNV, se unifica el esfuerzo nacional. A partir de ese momento se inicia una ruta de inversión económica sostenida en la política y de estandarización en los procesos de diseño y de construcción de las viviendas.

Hoy en día, el SFNV está compuesto por el Banco Hipotecario Nacional para la Vivienda (BANHVI), que es la institución técnica y financiera que lidera el sistema; más un conjunto de aproximadamente 26 entidades financieras que están autorizadas para tramitar, aprobar y emitir el Bono Familiar de Vivienda (BFV), que es un subsidio económico que el Estado costarricense brinda a familias para construir sus viviendas.

En el SFNV, la vivienda es diseñada y construida por constructores o desarrolladores privados que materializan la obra y son pagados por las entidades autorizadas, haciendo que el sistema funcione en esencia, como una gran alianza público-privada que produce, en promedio, 10.000 unidades anualmente [Fig. 2].

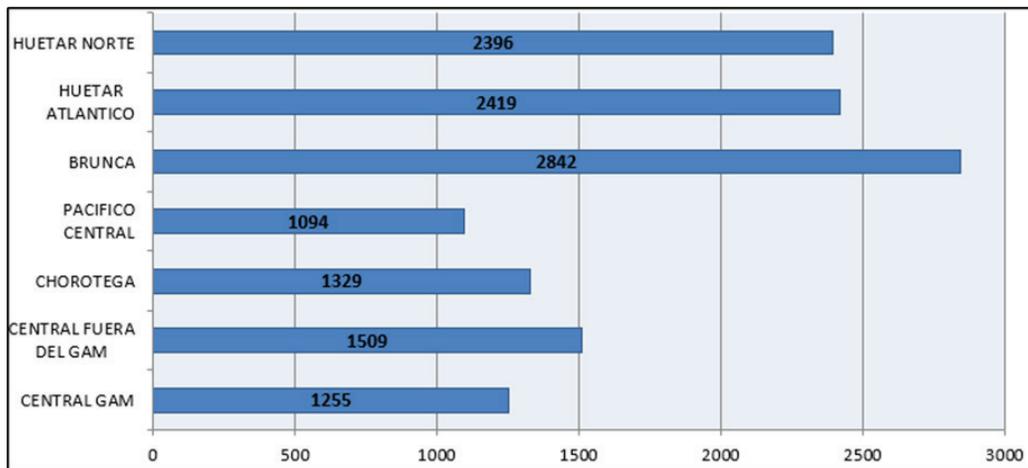


Figura 2. Bono Familiar de Vivienda entregados por región. Fuente: [11].

Ante la gran cantidad de viviendas que son construidas y de recursos públicos que son invertidos cada año en este sector, el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH) el CFIA llevan a cabo, desde el año 2006 un proceso de observación y revisión de muestras aleatorias de las viviendas que son producidas en el Sistema. Este análisis es conocido como la Auditoría de Calidad del CFIA a las Viviendas de Interés Social del SFNV. Es un mecanismo que contribuye con los procesos de aseguramiento de la calidad que son apropiados y necesarios para el sistema.

Objetivo de la investigación

Identificar la tendencia de cumplimiento de calidad de las Viviendas de Interés Social (VIS) construidas en Costa Rica entre 2006 y 2018 mediante el estudio de las auditorías de calidad del CFIA con tal de mejorar el entendimiento del desempeño de los proyectos VIS y facilitar el mejoramiento de las estrategias y políticas de calidad implementadas.

Metodología

Metodología de la investigación

Este artículo se enfoca en la evaluación técnica de las VIS que son auditadas por el CFIA entre 2006 y 2018.

Para el estudio, se obtuvieron y se revisaron los informes de las auditorías llevadas a cabo por el CFIA, durante el periodo en cuestión. Sobre las auditorías, se realizó un análisis y se extrajeron las variables que reflejan el cumplimiento de criterios de calidad técnica de las viviendas. para observar el comportamiento de estas a través del tiempo.

Por medio de la comparación de series históricas, en el artículo se estudian las tendencias de las variables técnicas documentadas en las auditorías a lo largo del periodo de estudio. Se contemplaron los principales aspectos estructurales, arquitectónicos, eléctricos, mecánicos y urbanísticos, fundamentales del diseño y de la construcción de las viviendas de interés social. A través de los análisis realizados, el artículo brinda una perspectiva de los avances, cambios y los problemas que han existido o que aún existen en el sector de Vivienda de Interés Social en Costa Rica.

Significancia estadística

Este artículo basa su validez estadística en la validez de las auditorías de calidad del CFIA. Para el caso de las auditorías de calidad de VIS realizadas entre 2006 y 2018, se tiene una confianza del 95.0 % para todos los años menos para el 2016, que cuenta con un 94.0 %. En el caso del error máximo de muestreo, se definió en un 5.0 % para todos los años menos el 2016, donde se utilizó un 6.5 %.

Metodología de las Auditorías CFIA

El CFIA realiza auditorías de calidad de las VIS que son financiadas con los fondos del SFNV. Estas auditorías se realizan en coordinación con el MIVAH, como ya se mencionó y por lo general, una auditoría de VIS se lleva a cabo cada dos años.

La información obtenida mediante las auditorías se presenta en un informe a las autoridades del Sector Vivienda. Sus conclusiones sirven como insumo para la toma de decisión y el impulso de acciones de mejora continua en el SFNV.

Para llevar a cabo la auditoría, el CFIA elige como su universo de estudio, la totalidad de soluciones de viviendas que son financiadas mediante los bonos del SFNV durante un año en particular. A partir de este universo, diseña una muestra representativa que guarda la misma proporción respecto a las entidades financieras que emitieron el bono durante ese año; así como también guarda la proporción respecto a los cantones en los que se construyeron las soluciones, en dicho periodo.

Las auditorías tienen un capítulo técnico y un capítulo social. Se cuenta con un procedimiento consistente de aplicación de la auditoría a cada caso, pues las personas que llevan a cabo cada inspección en sitio utilizan un formulario estándar y siguen una guía de aplicación.

Finalmente, la persona encargada de procesar los datos de los formularios digita toda la información recabada en sistemas de cómputo y los datos se procesan para dar lugar al informe final de la auditoría del año particular.

Datos generales de las auditorías utilizadas

Cantidad de viviendas auditadas

La cantidad de viviendas auditadas a lo largo del periodo analizado en este artículo no ha sido constante. En el año 2006 se tiene la población más grande con 373 viviendas y en el 2010 la más pequeña con solo 78. El resto de los años oscilan entre 231 y 323 viviendas [Fig.3].

Estos tamaños de muestra fueron definidos por el CFIA previamente a la elaboración de las auditorías, basándose en la cantidad de bonos de vivienda otorgados cada año y el porcentaje de confianza deseado.

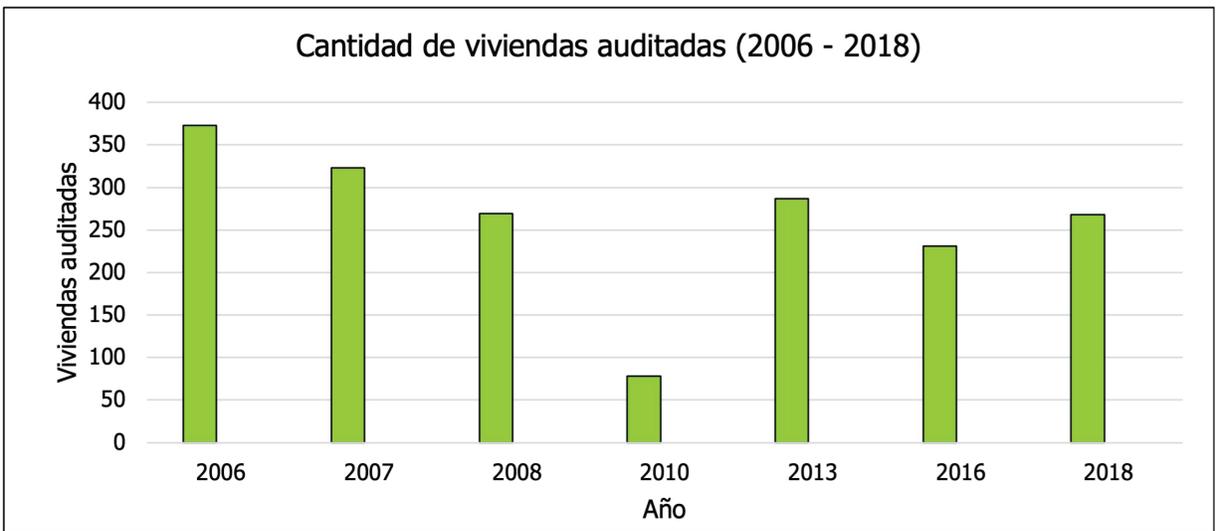


Figura 3. Cantidad de viviendas auditadas por año. Modificado de: [1]-[7]

Ubicación geográfica de las viviendas auditadas

Las viviendas auditadas se han distribuido históricamente de una manera variable, pero manteniendo ciertas tendencias. La provincia de Alajuela es la que, en mayor número de oportunidades ha tenido un porcentaje superior de todas las viviendas auditadas, mientras que Heredia ha tenido la porción menor, esto se evidencia en el Cuadro 1. Como se ha mencionado, la distribución de las viviendas auditadas corresponde, de manera proporcional, con la distribución espacial de los bonos de vivienda otorgados por el SFNV, en el periodo de estudio. Esto quiere decir que la distribución de bonos es amplia a lo largo del país. El único caso que podría requerir un análisis especial es el caso de la provincia de Heredia, que muestra consistentemente una participación menor a las otras provincias.

Cuadro 1. Distribución por provincias de las viviendas auditadas.

Provincia	Año					
	2007	2008	2010	2013	2016	2018
Alajuela	26.0 %	25.0 %	0.0 %	12.5 %	22.6 %	22.4 %
Cartago	11.5 %	11.0 %	0.0 %	20.6 %	9.8 %	8.2 %
Guanacaste	12.4 %	15.0 %	18.3 %	12.2 %	9.8 %	10.5 %
Heredia	3.1 %	2.0 %	13.4 %	0.7 %	4.3 %	3.7 %
Limón	10.8 %	14.0 %	0.0 %	18.5 %	20.9 %	20.2 %
Puntarenas	12.4 %	16.0 %	50.0 %	24.4 %	16.2 %	18.7 %
San José	23.8 %	17.0 %	18.3 %	11.1 %	15.0 %	16.4 %

Modificado de: [1]-[7]

Distribución según entidad financiera

A lo largo del periodo de estudio, los beneficiarios del SFNV han optado por diversas entidades financieras autorizadas para tramitar el BFV. La proporción de participación que muestra el Cuadro 2 no solo corresponde a la muestra auditada, sino que también es la proporción de participación real que tienen los diversos tipos de entidades financieras autorizadas, en

la emisión y formalización de bonos de vivienda en cada periodo. La variabilidad de esta distribución, que muestra el cuadro, se debe a las diferentes ofertas y facilidades que ofrecen las entidades a los interesados. En general, las Mutuales han sido las entidades con mayor grado de participación a lo largo del periodo estudiado.

Cuadro 2. Distribución de tipos de entidades financieras empleadas.

Entidad	Año					
	2006	2007	2008	2010	2013	2018
Bancos	12.1 %	18.0 %	23.4 %	0.0 %	20.1 %	9.4 %
Cooperativas	10.2 %	26.0 %	27.5 %	0.0 %	9.9 %	36.2 %
INVU	15.3 %	17.0 %	8.6 %	31.7 %	12.4 %	2.8 %
Fundaciones	12.6 %	19.2 %	16.0 %	68.3 %	20.1 %	7.5 %
Mutuales	42.3 %	19.8 %	15.6 %	0.0 %	37.5 %	41.4 %

Modificado de: [1]-[7].

Resultados

Sistemas constructivos y áreas predominantes

La elección del sistema constructivo en la vivienda de interés social es una elección importante, ya que el presupuesto disponible y el corto plazo buscado en la duración de la construcción de la obra, son factores que inducen a que las soluciones que se busquen sean las correspondientes a sistemas de fácil elaboración y bajo costo.

En la investigación realizada, se observó que las soluciones de vivienda auditadas en el periodo de estudio presentan variabilidad de materiales y métodos constructivos. Los sistemas más populares son el sistema integral de bloques de concreto y las baldosas horizontales de concreto (Cuadro 3). Este segundo sistema ha aumentado mucho en su uso, por tener un costo y tiempo de instalación bajos. Sistemas relativamente nuevos para el país como los sistemas de mampostería modular no han logrado aún porcentajes de participación importantes en viviendas de interés social, según recopiló el CFIA.

Sistemas constructivos como las estructuras de madera y el levantamiento de viviendas sobre pilotes también pueden verse a lo largo del periodo de estudio. Esto se debe primordialmente a técnicas para adaptarse al terreno, la ubicación u otras características de algunas de las viviendas. La vivienda en madera se ha utilizado con cierta frecuencia en territorios indígenas.

Cuadro 3. Distribución de sistemas constructivos empleados por las viviendas auditadas.

Sistema constructivo	Año						
	2006	2007	2008	2010	2013	2016	2018
Bloques de concreto	33.2%	40.3%	40.1%	0.0%	1.4%	38.1%	34.5%
Baldosas verticales	22.0%	19.2%	11.9%	0.0%	3.9%	6.1%	1.3%
Baldosas horizontales	38.3%	29.4%	38.3%	63.4%	75.8%	49.4%	58.3%
Super bloque	3.5%	5.9%	4.1%	18.3%	0.0%	2.2%	1.7%
Bloques y muro seco	2.1%	3.1%	4.8%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%
Madera u otro tipo de muro seco	0.9%	2.2%	0.8%	18.3%	18.9%	3.9%	4.3%

Modificado de: [1]-[7].

Con respecto a las áreas de construcción de las viviendas, según muestra el Cuadro 4, se observa que predominan viviendas cuya extensión promedio está en el rango de 40 a 60 m², que corresponde a viviendas con un diseño típico de dos o tres dormitorios, con 1 baño y un espacio combinado de sala comedor cocina. No obstante, en años recientes se ha detectado que algunas de las familias logran hacer ampliaciones a sus viviendas, en el periodo de los dos años siguientes en que se da la Auditoría y terminan con viviendas que se ubican en el rango de 60 a 80 m².

Cuadro 4. Área construida de las viviendas aditadas.

Área (m ²)	Año					
	2006	2007	2008	2013	2016	2018
40 - 50	86.6%	54.5%	52.0%	77.1%	40.3%	38.0%
50 - 60			13.8%	11.1%	19.5%	20.0%
60 - 70		4.3%	16.0%	3.7%	16.5%	13.0%
70 - 80		16.1%	9.3%	4.1%	10.8%	12.0%
80 - 90	4.2%	4.6%	4.8%	1.5%	4.8%	7.0%
90 - 100			1.9%	1.8%	3.9%	5.0%
100 - 120			1.1%	0.4%	3.5%	3.0%
Más de 120			1.1%	2.8%	1.1%	0.4%

Modificado de: [1]-[7].

Aspectos de diseño y de construcción que han cumplido con la norma

El diseño y construcción de vivienda en Costa Rica se caracteriza, en un alto porcentaje, por ser desarrollado dentro de la normativa de códigos de diseño, como el código sísmico y el código eléctrico.

Al hacer un breve análisis del Informe de Construcciones sin Permisos del CFIA [12], se extrae un 22% o más de la construcción en el país cumple con la normativa. Este porcentaje, que podría parecer alto, se ha deteriorado en años recientes, debido a las crisis que ha sufrido el país y que han inducido que un mayor porcentaje de obras que no se registran.

Sin embargo, para el caso de la Vivienda de Interés Social que es financiada por el SFNV, el 100% de las viviendas están debidamente registradas en el CFIA y cuentan con un profesional responsable de que el diseño cumpla con la normativa, ya que este es un requisito que exige el BANHVI. Adicionalmente, los procedimientos del SFNV piden que las obras sean inspeccionadas por un profesional responsable y por un fiscal de inversión, durante su periodo de ejecución. Debido a la combinación de estos factores, se encuentra un alto porcentaje de los elementos en las viviendas que cumplen apropiadamente con la norma de diseño y calidad constructiva. En los párrafos siguientes se mencionarán algunos de estos elementos.

Dentro de los aspectos analizados en las auditorías, se destacan las paredes, las ventanas y las puertas, como elementos que suelen presentar pocos problemas en su calidad o funcionamiento [1]-[7].

Las paredes han presentado problemas de desplomado en algunas de las primeras auditorías revisadas. Este tipo de problema ha sido mínimo en las últimas dos auditorías. Las ventanas presentan reventaduras y otros pormenores de manera rutinaria, pero esto se presenta en una

proporción mínima de las viviendas. Las puertas presentan la gran mayoría de sus problemas de instalación o calidad en los sistemas de cerraduras, aunque a pesar de esto, se presentan en pocas ocasiones.

También es relevante mencionar que, en un alto porcentaje, las viviendas no presentan problemas en sus sistemas de cimentación [1]-[7].

Uno de los elementos que han colaborado con el éxito de los proyectos VIS ha sido la presencia de avalúos firmados e informes de peritos para las viviendas previas a su construcción, lo que brinda herramientas valiosas para el buen desarrollo de los proyectos.

Aspectos de diseño y de construcción que han mejorado en el periodo de estudio

Una de las partes más importantes de este artículo, como se mencionó previamente, es analizar cómo varía la calidad de las viviendas a través del tiempo. Los cambios en la calidad de los materiales disponibles en el mercado costarricense, en sus costos o las mejoras en la capacitación de la mano de obra disponible pueden provocar mejoras en la calidad final de las viviendas construidas, sean de interés social o no. A continuación, se presentan las variables que más claramente se observa que han mejorado en su desempeño a lo largo del periodo de estudio.

El primero por destacar es la cantidad de viviendas que cuentan con servicios básicos, que son aquellos que una vivienda tradicionalmente requiere para cumplir sus funciones, como agua potable, electricidad, vías de acceso y manejo de aguas negras. Si bien hay servicios que se han mantenido presentes en las viviendas desde un inicio, como son el agua potable y las soluciones de manejo de aguas residuales, otros como el alcantarillado pluvial o la disponibilidad de hidrantes han mejorado en gran medida. Actualmente, con excepción de casos aislados, todas las viviendas cuentan con los servicios básicos [1-7].

En el cuadro 5 se presenta una selección de la cantidad total de subcomponentes constructivos que se revisan en la Auditoría del CFIA.

Los cielo rasos han presentado una mejora muy importante, pues pasaron de presentar problemas en aproximadamente el 30 % de los casos, a no presentar casi ninguno en los primeros cinco años analizados en este artículo (2006 a 2013) [1]-[7].

En el año 2014 entró en vigencia el nuevo Código Eléctrico de Costa Rica, y esta implementación trajo consigo una mejora en los criterios de seguridad y calidad aplicados a las nuevas edificaciones, incluyendo las viviendas de interés social. Entre los principales cambios se encuentran la mejora de los sistemas de puesta en tierra, la consolidación del segundo medio de desconexión (breaker principal), el uso de los disyuntores con mayor grado de seguridad (breakers) AFCI y GFCI, y el requisito de tuberías y accesorios certificados son incluidos como medida de seguridad [9].

En el Cuadro 6 se presenta el desempeño de la instalación eléctrica de las viviendas auditadas a lo largo del periodo de estudio. En este se aprecia que a partir de la novena auditoría (2016) disminuyen en gran medida los defectos en ciertos aspectos como la instalación de los medidores, de tapas para cajas de paso o la calidad de las previstas de 220 V. A pesar de esto, todavía existen ciertos rubros no presentan mejoras como la cantidad de conexiones expuestas.

Cuadro 5. mayores problemáticas en subcomponentes de las VIS.

Problemas detectados	Año						
	2006	2007	2008	2010	2013	2016	2018
Pisos							
Hundimiento	0.0%	6.7%	31.8%	58.3%	5.6%	4.7%	1.9%
Presenta fisuras	1.1%	58.3%	40.9%	47.0%	43.2%	20.1%	26.5%
Desprendimiento de lujado	4.8%	13.3%	7.6%	32.3%	3.1%	3.4%	2.2%
Paredes							
Presenta reventaduras o grietas	15.0%	0.0%	1.5%	0.0%	9.8%	0.0%	15.0%
Mal impermeabilización entre losas	11.0%	0.0%	0.0%	91.0%	4.5%	0.0%	0.0%
Falta de sujeción en paredes externas	22.0%	0.0%	0.0%	62.7%	0.0%	0.0%	28.0%
Desprendimiento de repello	0.0%	13.0%	8.6%	9.0%	17.0%	9.5%	0.0%
Solera y viga corona							
Incumple (no existe)	21.4%	15.5%	31.2%	11.3%	4.6%	0.9%	23.0%
Falla parcial (mal anclaje)	13.0%	4.0%	0.0%	30.7%	37.4%	13.2%	3.4%
Techo y cubierta							
Mala fijación de techos a viga corona	20.0%	2.2%	0.0%	0.0%	9.6%	0.0%	0.0%
Problemas en estructura de metal	0.0%	18.0%	33.5%	50.0%	9.6%	2.6%	0.0%
Marcos de ventanas							
Con problemas	0.0%	21.7%	19.7%	nd	63.7%	6.5%	14.0%
Marcos de puertas							
Mala calidad	10.0%	13.4%	35.3%	nd	18.1%	8.2%	7.8%
Cielo rasos							
Falta de cielos exteriores	32.0%	30.3%	30.3%	nd	0.0%	0.0%	6.2%
Aleros menores a 50 cm	19.0%	12.4%	20.4%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%
Sistema de evacuación pluvial							
Canaos y bajantes insuficientes	53.0%	48.6%	43.9%	nd	3.2%	53.0%	32.3%
Bajantes menores a 44 cm ²	38.0%	29.0%	66.2%	nd	4.3%	0.0%	0.0%
Falta de cajas de registro	38.0%	46.4%	89.2%	nd	4.7%	26.0%	44.0%

Modificado de: [1]-[7].

Cuadro 6. Problemas detectados en la instalación eléctrica de las casas auditadas.

Problemas detectados	Año					
	2006	2007	2008	2010	2013	2016
Prevista 220 V defectuosa	65.0 %	68.7 %	49.8 %	35.3 %	19.8 %	0.0 %
Centro de carga faltante o deficiente	36.0 %	25.0 %	29.0 %	71.8 %	7.5 %	27.0 %
Cables y conexiones expuestos	78.0 %	22.0 %	23.0 %	12.2 %	10.4 %	94.0 %
Cajas de paso y empalmes sin tapas	36.0 %	33.5 %	36.1 %	12.1 %	33.1 %	23.0 %
Medidor y cuchilla sin cubierta ante la lluvia	10.0 %	13.9 %	17.1 %	1.3 %	7.2 %	0.0 %

Modificado de: [1]-[7].

Según el CFIA en su novena auditoría [6, pp 32] se puede considerar que una vivienda tiene una instalación eléctrica muy satisfactoria cuando cumple con el 80 % de todos los requerimientos. En la Figura 4 se presenta la proporción de las viviendas auditadas que cumplen con este criterio.

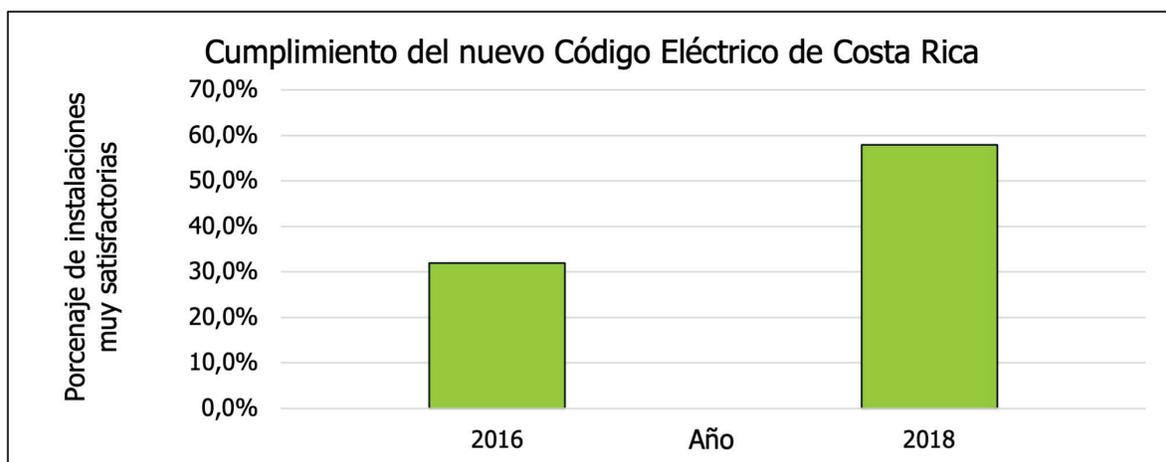


Figura 4. Viviendas auditadas con instalaciones eléctricas altamente satisfactorias según el nuevo Código Eléctrico de Costa Rica. Modificado de: [6], [7]

Aspectos de diseño y de construcción aún deben mejorar

Posiblemente la parte más importante del análisis de las auditorías del CFIA, consiste en identificar las áreas donde las viviendas auditadas presentan deficiencias que persisten a través del tiempo.

Los pisos de las viviendas auditadas tienen acabado lujado en la mayoría de los casos. Estos presentan alta tendencia a formar fisuras [1]-[7]. Este problema podría estar presente igualmente en las viviendas visitadas y que cuentan con piso enchapado con porcelanato o cerámica.

Las cubiertas y estructuras de techos son elementos que a menudo presentan problemas frecuentes y variados. Estos principalmente en la calidad de su estructura, ya sea metálica o de madera, en el calibre de las láminas de cubierta, en el estado, o en el detalle de anclaje de estas [1]-[7].

Finalmente, el rubro que presenta más deficiencias a lo largo de todo el periodo de estudio es la instalación mecánica de las viviendas. Tanto los sistemas de aguas jabonosas y de aguas residuales. Se observó que las instalaciones no presentan muchos de los accesorios necesarios para el correcto funcionamiento de los sistemas. Ejemplos son: las trampas de grasa, los ceniceros, los sifones o las cajas de registro (Cuadro 7). La disposición de aguas residuales es deficiente tanto en los sistemas primarios de manejo, tanques sépticos y plantas de tratamiento como también en la falta de en las tuberías de ventilación, que son necesarias para que el tanque o las plantas funcionen de manera correcta.

Cuadro 7. Problemas detectados en la instalación mecánica de las casas auditadas.

Problemas detectados	Año						
	2006	2007	2008	2010	2013	2016	2018
Ceniceros faltantes o deficientes	54.7 %	72.8 %	84.8 %	37.9 %	13.2 %	28.0 %	49.8 %
Trampa de grasa faltante o deficiente	0.0 %	47.4 %	92.6 %	28.6 %	50.2 %	100.0 %	49.8 %
Falta sifón en el fregadero	0.0 %	70.3 %	91.1 %	76.5 %	42.4 %	54.0 %	31.5 %
Tubería para ventilación inapropiada	85.3 %	72.5 %	72.5 %	40.2 %	12.1 %	49.0 %	27.0 %
Cajas de registro inapropiadas	62.5 %	59.1 %	94.4 %	28.7 %	24.6 %	47.0 %	54.5 %
Sistema de manejo de aguas negras deficiente	35.7 %	27.9 %	81.5 %	16.1 %	10.3 %	0.0 %	0.0 %

Modificado de: [1]-[7].

Una mirada hacia adelante y algunas recomendaciones

El análisis de las auditorías de VIS del CFIA y los elementos que estas apuntan permiten construir, usando la herramienta del diagrama Ishikawa, una mirada hacia adelante con una propuesta de diversos aspectos por mejorar en cuanto a la calidad de las viviendas. Se propone enfocarse en cinco dimensiones: Supervisión, Capacitación, Normativa, Responsabilidad profesional e Innovación. Para cada una de estas líneas de trabajo, en la Figura 5 se presentan líneas de trabajo de menor escala.

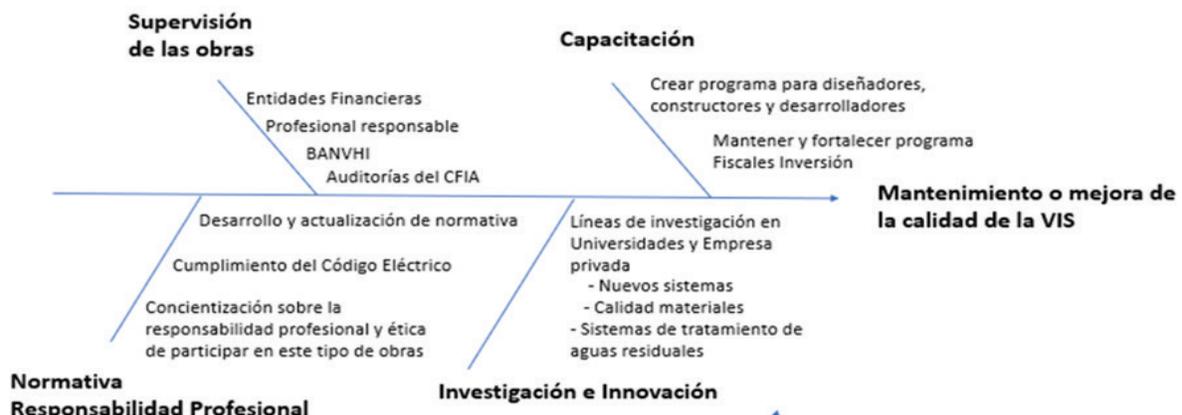


Figura 5. Diagrama de Ishikawa: Mantenimiento o mejora de calidad de la VIS.

Conclusiones

- En general se observa que las obras cumplen con la normativa nacional, se apegan a los códigos técnicos y presentan una participación de los actores requeridos para las fases de diseño y ejecución de la obra (profesional responsable, director técnico y fiscal de inversión).
- La cantidad de viviendas auditadas provee suficiente apoyo estadístico como para obtener conclusiones acerca del universo de la VIS en Costa Rica. El año 2010 tiene el particular de que su enfoque no fueron todas las VIS, sino los proyectos de viviendas múltiples. Por este motivo, a pesar de que los datos son estadísticamente apropiados y válidos, debe de tomarse precaución a la hora de utilizarlos, pues estos no ilustran el comportamiento de todas las VIS construidas en este año.
- Los acabados de las viviendas auditadas cumplen con los estándares de calidad del CFIA definidas en las auditorías en su mayoría. Se tiene la excepción de los pisos lujados que presentan varios problemas, mas esto se debe en gran medida a la naturaleza de este tipo de acabado. Con esta excepción, las viviendas suelen tener acabados apropiados, especialmente en los últimos años, donde se han reducido o eliminado la mayoría de los problemas analizados.
- Los sistemas constructivos más populares para paredes en las viviendas auditadas son la mampostería de bloques de concreto y las baldosas horizontales de concreto. Estos sistemas presentan pocos problemas de calidad o acabado y son opciones viables que facilitan una construcción rápida y efectiva de las viviendas. En el caso de las estructuras de techos, la gran mayoría se componen de estructuras metálicas. Estos presentan pocos problemas de calidad. Las láminas utilizadas de cubierta presentan deficiencias con cierta frecuencia.
- Los sistemas eléctricos de las VIS han mejorado parcialmente con la introducción del nuevo Código Eléctrico de Costa Rica. El cambio no ha sido total, pues aún hay rubros donde las viviendas auditadas todavía presentan fallas importantes como previstas y centros de carga defectuosos. Con base en el criterio técnico tomado en las auditorías, se determinó que el 32 % en el 2016 y el 58 % en el 2018 tenían instalaciones eléctricas muy satisfactorias, porcentajes que evidencian una mejora importante contra años anteriores.
- De todos los rubros evaluados, el más deficiente es el del sistema mecánico de las viviendas. La mayoría de las deficiencias se asocian a ausencia o fallas en accesorios importantes como ceniceros, sifones o trampas de grasa, que son importantes para el buen funcionamiento y confort en las viviendas. De igual manera, también se presentan problemas importantes en los sistemas de manejo de aguas negras, ya sea en sistemas con tanque séptico o con alcantarillado sanitario.

Referencias

- [1] CFIA. "IV auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. IV, 2006.
- [2] CFIA. "V auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. V, 2007.
- [3] CFIA. "VI auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. VI, 2008.
- [4] CFIA. "VII auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. VII, 2010.

- [5] CFIA. "VIII auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. VIII, 2013.
- [6] CFIA. "IX auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. IX, 2016.
- [7] CFIA. "X auditoria de calidad Vivienda de Interés Social", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. X, 2018.
- [8] CFIA. "Auditoría del CFIA a la Vivienda de Interés Social del SFNV - Alcance y metodología", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. No.1, 2021.
- [9] "Reglamento de Oficialización del Código Eléctrico de Costa Rica para la Seguridad de la Vida y de la Propiedad", CIEMI (Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales). N.36979-MEIC, Pp. 1-40, San José, Costa Rica.
- [10] R. Tan Nicaretta, "América Latina y el Caribe encaran creciente déficit de vivienda", *Banco Interamericano de Desarrollo (IADB)*, may. 14, 2012. Disponible: <https://www.iadb.org/es/noticias/estudio-del-bid-america-latina-y-el-caribe-encaran-creciente-deficit-de-vivienda>.
- [11] BANHVI. "Estadísticas del Bono de Vivienda", Banco Hipotecario para la Vivienda. San José, Costa Rica. Rep. tec. 2021.
- [12] CFIA. "Informe especial: Obras sin permiso", Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica. Rep.tec. I-401-2021-DGP, 2021.

Valor del peso específico del cemento para diseño de concretos

Specific gravity value of cement for concrete design

Víctor Manrique Obando-Angulo¹

Fecha de recepción: 18 de octubre, 2022

Fecha de aprobación: 29 de enero, 2023

Obando-Angulo, V.M. Valor del peso específico del cemento para diseño de concretos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 59-67.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6311>

¹ Universidad Fidélitas. Costa Rica.
Correo electrónico: hisecoconsultora@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9650-8671>

Palabras clave

Cemento; concreto; ahorro; peso específico; ajuste volumétrico; Clinker.

Resumen

Generalmente cuando se realiza un diseño de concreto se utiliza el valor de peso específico para transformar volúmenes a masas y viceversa. Para el cemento el valor estándar de este parámetro es de 3,18, pero estudios realizados indican que este valor es muy variable según la composición del cemento. En el presente artículo, se exhibirán los resultados experimentales obtenidos al dosificar concretos bajo la metodología ACI-211.1-91, utilizando cementos mixtos adicionados como el tipo MM/B(P-C)-28, el cual tiene adiciones de puzolanas, caliza y yeso. La metodología está basada en cementos puros con factores clinker de hasta 95% que en el caso del cemento utilizado este factor posee un valor entre el 65% y 79%. Con base al esquema experimental planteado, se logró determinar que el peso específico de los cementos varía según su composición; factor directamente ligado a sus adicciones. En este caso se llegó a la determinación que para un diseño de concreto siempre se debe verificar el valor de este parámetro, ya que al pasar de pesos a volúmenes esa diferencia en el valor se refleja en una proporción mayor o menor del cemento requerido. Este parámetro que generalmente se asume como 3,18 varía según el tipo de cemento; por ejemplo, en el cemento tipo MM/C (P-C)-28 este valor es de 2,81, por lo que al pasar una dosificación de 100 m³ de concreto de masas a volúmenes esto puede implicar un sobredosificación de hasta 100 sacos de cemento, lo que a su vez significa un aumento en costos y puede provocar problemas asociados como sobre rigidez y alto calor de hidratación.

Keywords

Cement; Concrete; Saving; Specific weight; volumetric adjustment; Clinker.

Abstract

Generally, when a concrete mix is designed, the value of the cement specific weight is used to convert volumes to weights and the other way around. For cement, the standard value of this parameter is generally accepted in 3.18, but studies indicate that this value is highly variable depending on the cement composition. In this article, the experimental results obtained by designing the concrete JMF under the ACI-211.1-91 methodology was analyzed, using mixed cements such as MM/B(P-C)-28, which has additions of pozzolans, limestone and gypsum. The methodology is based on pure cements with clinker factors of up to 95%, which in the case of the cement used, has a value between 65% and 79%. Based on the proposed experimental scheme, it was possible to determine that the specific weight of the cement varies according to their composition, which is directly linked to their addictions. In this case, it was concluded that for a concrete mix design, the value of this parameter must always be verified, since when passing from weights to volumes, the value can greatly affect the required proportions of cement. In general the parameter is accepted as 3.18 but it varies significantly according to the type of cement: for example in cement type MM/C (P-C)-28 this value is 2.81. The previous means that when converting 100 m³ of concrete from mass to volume, an overdosage of up to 100 bags of cement can occur, which in turn increases costs and causes problems such as over-rigidity and high hydration heat.

Introducción

En recientes investigaciones realizadas en Costa Rica sobre el diseño de concreto como la del Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto (ICCYC), en el año 2020, se determinó que un 45% del concreto utilizado en la GAM (Gran Área Metropolitana) no cumple con la resistencia mínima a la compresión especificada por el Código Sísmico de Costa Rica: 210 kg/cm² o 20,594 MPa. Dicha investigación concluye que, estos resultados negativos tienen como principal causa, el desacertado proporcionamiento del concreto [1].

La metodología más utilizada para proporcionar concreto es la del ACI, dando como resultado los pesos de las cantidades de materiales que componen el concreto (Agregados, Agua y Cemento) para lograr obtener la resistencia final requerida a los 28 días de edad. En este aspecto esta metodología puede dar los resultados por pesos, pero también se pueden transformar a volúmenes que en la práctica facilita el proceso de dosificación del concreto. Para poder transformar las cantidades de peso a volumen se usa el parámetro de peso específico del cemento. Sin embargo, si este valor no está bien calculado puede dar como resultado una cantidad menor o mayor de material y afectar la resistencia del concreto, así como aumentar su costo de producción considerablemente.

Kosmatka [2] señala que “*El peso específico del cemento varía de 3,10 hasta 3,25, con promedio de 3,15 Mg/m³*” (p. 67), en Costa Rica este parámetro se ha establecido en un valor promedio de 3,15. Esto fue consultado a tres laboratorios de referencia certificados en el país y todos concordaron en que el valor de gravedad específica utilizado es de 3,15 [3].

En una investigación de grado realizada por Luis Felipe Hernández Mora, se logró comprobar que el valor del peso específico del cemento es variable y no se puede establecer como un valor fijo [4].

Existen varias investigaciones en las que el parámetro del peso específico del cemento se ha determinado, dando como resultado una alta variabilidad en este valor, tal es el caso de la investigación realizada por Jorge Andrés Delgado Castro llamada Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados, se evidencia que el peso específico varío según el tipo de adiciones y modificaciones [5].

Metodología

Como primer paso se procedió a validar la información del valor de peso específico utilizado por algunos laboratorios acreditados de materiales de construcción. Luego se realizó la caracterización de los agregados bajo las normas ASTM e INTECO obteniendo los valores de gravedad específica, granulometrías, pesos unitarios y porcentaje de absorción.

Una vez caracterizado los materiales se dosificó concreto bajo la metodología del ACI 211.1-91. utilizando un peso específico para el cemento de 3,18 transformando así los pesos obtenidos a volúmenes, para producir 50 litros de concreto. Una vez realizado este cálculo se moldearon cilindros de concreto de 100 mm x 200 mm para poder fallarlos a los 7 y 28 días en aras de comprobar la resistencia [6].

Obtenidos los datos del primer diseño se verificó el valor del peso específico del cemento utilizado según la norma ASTM C 188-95, dando un valor distinto al usualmente utilizado por los laboratorios. Con dicho valor real, se vuelve a proporcionar concreto con el valor obtenido de peso específico y se moldean cilindros de concreto para poder medir el efecto tanto en la resistencia como en la cantidad de cemento que se añade a la mezcla y poder identificar problemas asociados como aumento de costos y cambio en la resistencia a la compresión final.

Se revisaron los parámetros que pueden influir en esta problemática y se determinó que los principales son: el tipo de cemento que se distribuye (ya que el factor clinker es muy variado), la densidad de los agregados (esta varía según la fuente), el peso específico del cemento, así como una mala interpretación de las principales metodologías de diseño como la del ACI 211.1-91 [6].

Para este trabajo se diseñó un concreto bajo la metodología del ACI con agregados de una sola fuente, que cumpliera con las especificaciones en cuanto a granulometrías. En el caso de los pesos específicos de los agregados, se buscó que estuvieran en un valor cercano a 2,50 para controlar la influencia de este parámetro dentro de la resistencia final del concreto. Para transformar los diseños de peso a volumen se utiliza el peso específico de los materiales.

Los especímenes preparados se fallaron para la comprobación de la resistencia a la compresión a los 28 días y en este primer diseño la resistencia con el valor de peso específico de cemento de 3,18 para obtener una resistencia final de 280 kg/cm². Las pruebas a los 28 días arrojaron un valor promedio de 378,32 kg/cm² con una desviación estándar de 1,13 kg/cm² excediendo así la resistencia de diseño en un 35% aproximadamente.

En una segunda comprobación se volvió a diseñar para la misma resistencia, pero con un valor para peso específico de 2,81 y en este caso el resultado promedio de la resistencia a los 28 días fue de 185,79 kg/cm² con una desviación estándar de 1,10 kg/cm². En este caso la resistencia estuvo casi un 34% por debajo del valor de diseño.

Ambos diseños se realizaron bajo igualdad de condiciones, con los mismos agregados, siendo el peso específico del cemento para proporcionar por volumen, como comúnmente se realiza en el campo la única variable que se modificó, siendo este el parámetro que causa la gran diferencia en la resistencia final del concreto y provoca que se exceda o más bien pueda haber una falta de resistencia.

Este valor de peso específico de los cementos es muy variado y aunque las cementeras mantienen el proporcionamiento de los cementos muy constante siempre puede haber una variación en la composición esto porque el factor clinker se da en rangos y las adiciones pueden variar en porcentaje, de esta manera el peso específico de los cementos puede variar para un mismo tipo de cemento.

Se obtuvieron datos de una investigación realizada por Hernández [4], donde el autor logra obtener datos específicos sobre este la gravedad específica de algunos cementos de uso común. El cemento que se utilizó en este trabajo no estaba dentro de los estudiados por Hernández [4].

En este caso existen dos parámetros que pueden estar influenciando la diferencia del peso específico: 1) el factor clinker que es distinto para el cemento MM/B(P-C)-28 y el cemento MM/C (C-P)-28, a pesar de que la gravedad específica es muy similar entre ambos, se puede determinar que la composición de las adiciones son la principal causa de la variación de este factor.

Para poder entender mejor esta variación, se desarrolló el presente proyecto en la Universidad Fidélitas de Costa Rica. Lo anterior para comprobar la afectación que provocaba la variación del valor de peso específico del cemento en los diseños de concreto, utilizando la metodología del ACI 211.1-91 como metodología de diseño de mezcla. Se requirió una cantidad de muestras de 3 para cilindros de 100 mm x 200 mm que son los utilizados en este caso para garantizar la representatividad.

Para poder establecer correcciones se realizan proyecciones con especímenes de 7 días y 14 días de edad y estos se confirman los datos de las proyecciones con los especímenes de 28 días de edad donde el concreto alcanza aproximadamente el 99% de su resistencia a la compresión.

Todos los ensayos se realizaron bajo la metodología de la ASTM e INTECO, con los equipos del laboratorio de materiales y suelos de la Universidad Fidélitas, cumpliendo con los estándares de las normas se reduce el error que se pueda dar en los resultados finales.

Análisis de resultados

Para el primer concreto que se diseñó bajo la metodología ACI 211.1-91 se caracterizaron los agregados bajo las normas ASTM. Para la estimación de cada parámetro se realizaron 3 repeticiones para comprobar el valor, dando como resultado los siguientes resultados que se observan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros promedios de la caracterización de los agregados para el proporcionamiento de concreto.

Agregado	Gravedad específica	% de absorción	Peso unitario envarillado (kg/m ³)	Peso unitario sin envarillar (kg/m ³)	Módulo de finura
Fino	2,01 (0,3)	11,69 (3,7)	1159,11 (7,2)	1279,71 (5,6)	3,00
Grueso	2,42 (0,2)	2,41 (2,3)	1308,40 (5,3)	1510,97 (3,2)	N/A

Nota: valor en paréntesis representa el coeficiente de variación.

Una vez caracterizados los agregados que se utilizaron en el trabajo y bajo la hipótesis que el factor de los cementos que produce una variación en el peso específico son las adiciones (debido a que el factor clinker en algunos casos es el mismo para diferentes tipos de cementos siendo la única variante la composición de las adiciones como las calizas, puzolanas, escoria de Alto Horno y humo de sílice). Se propone trabajar con los tipos de cementos más comunes y sus composiciones para esto se utiliza la norma INTE C147, en la cual se dan las principales características de composición de los cementos a nivel país estos datos se muestran en el cuadro 2.

Para la investigación no se realizó una caracterización exhaustiva de todos los cementos que existen en la norma, solo se consideraron los obtenidos por Hernández [3], en su investigación llamada “Resistencia a compresión simple versus tiempo de curado en especímenes de concreto hidráulico utilizando cementos modificados”.

Para el caso del cemento que se utilizó en esta investigación, el MM/B (P-C)-28, se buscó utilizar el valor indicado en el cuadro 3. No obstante, el parámetro del peso específico requerido no se encuentra en dicha investigación por lo que se debió proceder con la realización del ensayo correspondiente para obtener el dato.

Cuadro 2. Composición de los cementos hidráulicos según la norma INTE C147.

Tipos	Denominación	Tipo/ Grado de sustitución	Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas	Caliza	Componentes minoritarios adicionales
Tipo I	Cemento Portland Ordinario (CPO)	Tipo I	95-100	-	-	-	-	0-5
Tipo MP	Cemento Hidráulico con; Puzolana, Ceniza volante, Esquistos	MP/A	80-94	-	-	jun-20	-	0-5
		MP/B	65-79	-	-	21-35	-	0-5
		MP/C	45-64	-	-	36-55	-	0-5
		MP/D	20-44	-	-	56-80	-	0-5
Tipo MC	Cemento Hidráulico con Caliza	MC/A	80-94	-	-	-	jun-20	0-5
		MC/B	65-79	-	-	-	21-35	0-5
		MC/C	45-64	-	-	-	36-55	0-5
Tipo MM	Cemento Hidráulico Modificado Mixto	MM/A	80-94	jun-20				0-5
		MM/B	65-79	21-35				0-5
		MM/C	45-64	36-55				0-5
		MM/D	20-44	56-80				0-5
		MM/E	may-19	81-95				0-5
Tipo ME	Cemento Hidráulico con Escoria de Alto Horno	ME/A	80-94	jun-20	-	-	-	0-5
		ME/B	65-79	21-35	-	-	-	0-5
		ME/C	45-64	36-55	-	-	-	0-5
		ME/D	20-44	56-80	-	-	-	0-5
		ME/E	may-19	81-95	-	-	-	0-5
Tipo MF	Cemento Hidráulico con Humo de sílice	MF/A	90-94	-	6-oct	-	-	0-5

Fuente: [7].

Cuadro 3. Peso específico de algunos cementos de uso común.

Tipo de cemento	Valor
MM/C (P-C)-28	2,81
MM/C (C-P)-28	2,84
MC/A-AR	3,10

Fuente: [4].

El cemento que se utilizó en el diseño fue el MM/B(P-C)-28, uno de los más comunes en el mercado y para obtener el peso específico de este se utilizó el ensayo correspondiente bajo la normas ASTM 188-95, AASHTO T-133 [8]. Para lograr un parámetro más certero se repitió el ensayo 4 veces esperando una desviación estándar baja y se utilizó el promedio de los datos obtenidos dando como resultado los parámetros del cuadro 4.

Cuadro 4. Resultados de la determinación del peso específico del cemento MM/B (P-C)-28.

Parámetro	Valor*
Medición 1	2,91
Medición 2	2,90
Medición 3	2,91
Medición 4	2,91
Promedio	2,91
Coefficiente de Variación %	0,70

*Valores redondeados a dos cifras significativas.

Para poder entender mejor los resultados obtenidos del estudio de este parámetro del diseño de concreto, se debe observar la figura 1, donde se logra ver una relación directa entre la cantidad de adiciones según el cuadro 2, presentes en el cemento y el peso específico del mismo.

Como las adiciones que poseen los cementos están dadas por rangos, este parámetro puede variar en cada uno de los tipos de cementos. El peso específico del cemento no es un parámetro que se debe dar por establecido, sino que se debe medir para el cemento que se utilice.

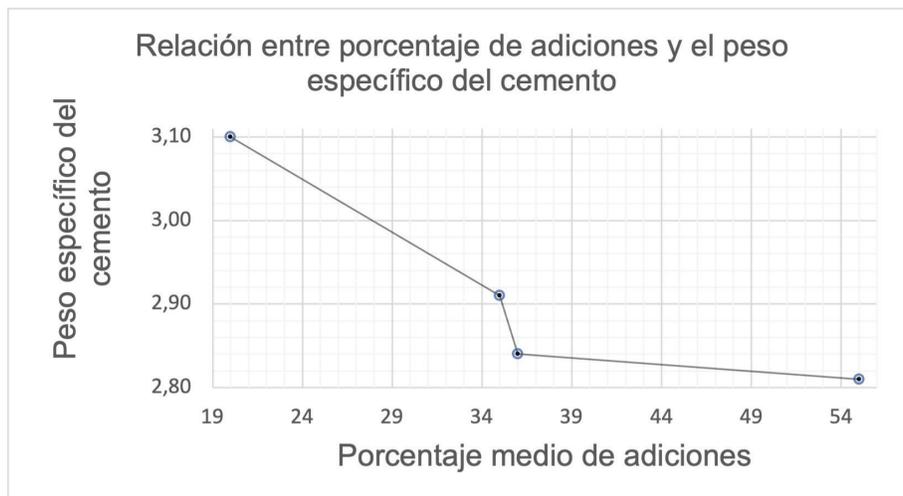


Figura 1. Gráfico de comparación entre el porcentaje de adiciones presentes en el cemento y el peso específico.

Cuadro 5. Comparación entre la dosificación de concreto con el valor de gravedad específica del cemento asumido vs real.

Peso específico del cemento 2,81			Peso específico del cemento 3,18			
Masa para 100 m ³ de concreto (kg)	Peso específico	Volumen para 100 m ³ de concreto (m ³)	Material	Masa para 100 m ³ de concreto (kg)	Peso específico	Volumen para 100 m ³ de concreto (m ³)
23838.194	1,000	23,838	Agua	23838,194	1.000	23,838
35171.103	2,810	12,516	Cemento	35171,103	3,180	11,060
97378,781	2,420	40,239	Grava	97378,781	2,420	40,239
43026,530	2,010	21,406	Arena	45953,716	2,010	22,863
Diferencia entre los dos volúmenes según el peso específico utilizado					1,456	
Diferencia entre los dos volúmenes (En masa) según el peso específico 3.18					4631,070	
Diferencia entre los dos volúmenes (En masa) según el peso específico 2.81					4092,235	
Diferencia entre los dos volúmenes (En sacos de cemento 50 kg) según el peso específico 3.18					92,621	
Diferencia entre los dos volúmenes (En sacos de cemento 50 kg) según el peso específico 2.81					81,845	

En el cuadro 5 se puede observar la comparación entre utilizar un peso específico del cemento de 2,81 y 3,18, para convertir un peso a volumen en un diseño de concreto de 100 m³, si bien el volumen es muy alto, se hace de esta manera para dimensionar el problema en números más entendibles que en este caso pueden hacer una diferencia de hasta 93 sacos de cemento de 50 kg, entre una comparación y otra.

Esta diferencia de casi 100 sacos de cemento podría estar faltando o estar sobrando en una obra de construcción. Los costos económicos se pueden cuantificar en el aumento de hasta un 10% y también en un concreto ese faltante de cemento puede bajar de manera considerable la resistencia final requerida o en caso contrario, sería un exceso que puede provocar problemas de sobre rigidez, sobre costos y resistencias muy altas para lo requerido. Inclusive el problema se agravaría entre mayor sea la diferencia entre estos valores.

Conclusiones

El concreto es uno de los materiales de construcción de mayor uso, de allí que se vuelve de suma importancia el poder optimizar los diseños de este material para poder disminuir los sobre costos asociados a diseños muy conservadores o malos, así como otros problemas asociados que no son analizados directamente en este documento, como la sobre rigidez o bajas resistencia del concreto.

En esta investigación se planteó como meta, lograr determinar por qué, cuando se diseñan concretos siguiendo como base la metodología del ACI, que es la más comúnmente usada, las resistencias finales no alcanzan el valor requerido o algunas veces se sobrepasa. Dentro de los parámetros que se determinaron influían este fenómeno están los pesos específicos de los materiales, el cual se controló caracterizando y trabajando con materiales de una sola fuente y que cumplieran con los parámetros establecidos para el diseño de concreto, reduciendo

los posibles factores que influían en estas bajas o elevadas resistencias. Por tanto, el efecto cuantificado fue el peso específico utilizado para transformar el peso del cemento a volumen que es como usualmente se proporciona el concreto.

Para un diseño de concreto eficaz y que este apegado a la maximización de costos se debe comprobar y determinar el peso específico del lote de cemento que se trabajará y en este caso no dar por sentado un valor absoluto de este parámetro ya que puede variar entre un tipo de cemento u otro y hasta entre lotes del mismo tipo de cemento se puede dar una variación considerable.

El exceso de cemento en un concreto no solo aumenta los costos considerablemente si no que puede provocar problemas como alto calor de hidratación, agrietamientos, sobre rigidez y hasta pérdida de resistencia debido a la falta de agua para poder generar la reacción del total de cemento contenido en la obra.

Es importante también tener en cuenta que la resistencia del concreto siempre está implicada en los cálculos estructurales, por lo que se vuelve necesario controlar y vigilar que se esté cumpliendo los parámetros con los cuales fue dosificado para obtener la resistencia final a los 28 días.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales a mi familia por apoyarme siendo pacientes con el tiempo que invertí para desarrollar esta investigación, agradezco en gran medida a la Universidad Fidélitas por confiar en mi persona para desarrollar esta investigación y agradezco a todas las personas que de una u otra manera brindaron la colaboración para poder concluir este proyecto.

Referencias

- [1] Instituto Costarricense sobre el Cemento Y el concreto (ICCYC) "Investigación sobre la calidad del concreto hecho en obra 2020" ICCYC, CFIA, 2020.
- [2] Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Illinois, Portland Cement Association, Skokie, 2004.
- [3] V. Obando. "Propuesta de modificación a la relación agua-cemento indicada en el ACI 211.1-91 para un concreto de resistencia a la compresión de 280 kg/cm², de peso normal sin aire incluido y diseñado por resistencia" Universidad Fidélitas, Costa Rica, 2021.
- [4] L. Hernández. (2018) Resistencia a compresión simple versus tiempo de curado en especímenes de concreto hidráulico usando cementos modificados [Online] Available: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/6532>
- [5] A. Delgado (2019) Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados [Online] Available: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/6535>
- [6] American Concrete Institute (ACI), "PRC-211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" (Reapproved), 2019.
- [7] INTECO. "Cemento hidráulico requisitos", *INTE C147:2015*, INTECO, 2018.
- [8] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", *ASTM C-188-95*, 2016.

Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México

Calculation of biogas generation by the anaerobic digestion method from biomass extracted from the Ecatepec's central de abasto, Mexico

María Concepción Martínez-Rodríguez¹, Lorena Elizabeth Campos-Villegas², Brandon Piña-Garrido³

Fecha de recepción: 26 de setiembre, 2022

Fecha de aprobación: 11 de enero, 2023

Martínez-Rodríguez, M.C; Campos-Villegas, L.E; Piña-Garrido, B. Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 68-75.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6106>

1 Instituto Politécnico Nacional. México. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

2 Instituto Politécnico Nacional. México. Correo electrónico: lecamposv@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-7248-9296>

3 Instituto Politécnico Nacional. México. Correo electrónico:

bpinag@alumno.ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-3264-3604>

Palabras clave

Biomasa; digestión anaerobia; biogás; potencial energético; residuos sólidos orgánicos.

Resumen

La Central de Abasto de Ecatepec es el centro de comercio más grande que se encuentra en el municipio y alberga aproximadamente 700 negocios se trabajó con una población de 84 cuyos productos en venta principales son frutas, verduras, carnes, abarrotes, dulces, flores, entre otras cosas, generando alrededor de 18 toneladas de residuos diarios, siendo el 44% del tipo orgánico. Estos residuos son depositados en contenedores y después transportados a tiraderos de basura, perdiéndose así todo tipo de aprovechamiento energético. Con la finalidad de aprovechar y visibilizar la capacidad energética de esos residuos, así como fomentar el uso y aprovechamiento de las energías verdes, se ha realizado la presente investigación la cual tiene el objetivo de calcular la valoración de energía que se puede obtener mediante la generación de metano a partir de los residuos sólidos orgánicos acumulados en un biorreactor de tanque discontinuo a través del método de digestión anaerobia en la zona de la Central de Abasto de Ecatepec de Morelos. Bajo las condiciones adecuadas y el uso del biorreactor indicado, la biomasa generada en la zona de estudio puede llegar a producir hasta 517.67 kWh, un valor que, aunque no alcance a cubrir la demanda actual de energía en la zona, representaría un 22% en el aprovechamiento de las energías limpias en la central de abastos de Ecatepec, Estado de México.

Keywords

Biomass; anaerobic digestion; biogas; energy potential; organic solidwaste.

Abstract

The Central de Abasto Ecatepec is the largest trade center in the municipality and houses approximately 700 businesses, it worked with a population of 84 whose main products for sale are fruits, vegetables, meats, groceries, sweets, flowers, among other things, generating around 18 tons of daily waste, 44% of which is organic. This waste is deposited in containers and then transported to garbage dumps, thus losing all kinds of energy use. In order to take advantage of and make visible the energy capacity of these residues, as well as to promote the use and exploitation of green energies, the present investigation has been carried out, which has the objective of calculating the valuation of energy that can be obtained through the generation of methane from organic solid waste accumulated in a batch tank bioreactor through the anaerobic digestion method in the area of the Central de Abasto de Ecatepec de Morelos. Under the right conditions and the use of the indicated bioreactor, the biomass generated in the study area can produce up to 517.67 kWh, a value that, although it does not cover the current energy demand in the area, would represent 22% in the use of clean energy at the Ecatepec supply center, State of Mexico.

Introducción

La biomasa es toda materia orgánica capaz de fungir como fuente energética al ser sometida a distintos procesos que pueden ser bioquímicos o termoquímicos. Existen distintos tipos de biomasa, entre éstos están la biomasa agrícola, procedente de materia animal o vegetal residual de la actividad agrícola; forestal, procedente de masas arbóreas; acuática, cuando proviene de plantas y algas acuáticas; y de residuos urbanos, provenientes de núcleos urbanos [1]. Se ha considerado a la biomasa como un recurso renovable porque es parte de un flujo natural y repetitivo de la naturaleza [2].

Sea de origen vegetal o animal, la biomasa está compuesta principalmente por los elementos carbono, oxígeno e hidrógeno formando compuestos que almacenan grandes cantidades de energía, sin embargo, el contenido es menor al que poseen los combustibles fósiles debido a que hay una mayor relación entre las cadenas oxígeno-hidrógeno con respecto al carbono y justamente las cadenas carbono-carbono son quienes almacenan la mayor cantidad de energía [2].

Ésta puede ser aprovechada para transformarse principalmente en energía eléctrica mediante la generación de biogás, este último es un proceso natural producto de la degradación de la materia orgánica confinada en un espacio bajo condiciones específicas [3].

El método más tradicional de aprovechamiento energético es la combustión, cuyas emisiones a la atmósfera son equilibradas y, a diferencia de las energías fósiles, genera compuestos que no alteran la composición de la atmósfera y la mantiene a niveles constantes [4]. Sin embargo, existen otros métodos ampliamente utilizados (tabla 1) como lo es la digestión anaerobia donde se aprovechan incluso los residuos generados a partir de su producción [5].

En Ecatepec el centro de comercio más grande en el municipio, es la Central de Abastos se encuentra seccionada en siete naves de aproximadamente 100 locales, es decir, cuenta aproximadamente con 700 negocios. Los principales productos comercializados son frutas, verduras, carnes, abarrotes, dulces, flores, entre otras cosas. Dentro de la zona se generan alrededor de 18 toneladas de residuos diarios que son depositados en contenedores y después transportados a tiraderos de basura, de estos residuos aproximadamente el 44% es de origen orgánico y pueden ser utilizados para su tratamiento en el reactor.

La valorización y cuantificación energética de la biomasa se estima por la cantidad de energía que contiene o puede llegar a liberar cuando es sometida a los diferentes procesos de conversión energética [6]. Dependiendo del tipo de proceso empleado se obtienen diferentes productos primarios, que posteriormente se pueden transformar en otros productos con mayor valor comercial, como combustibles comunes (gasolina y diésel-oil), combustibles oxigenados (metanol) y otros productos como hidrógeno y amoníaco [5] (cuadro 1).

Cuadro 1. Productos finales de mayor valor comercial obtenidos a partir de los diferentes métodos de procesamiento de biomasa a los que se someten diferentes productos primarios.

Proceso de conversión	Producto primario	Procesamiento posterior	Producto final
Combustión	Energía calorífica	Calderas	Energía eléctrica
Licuefacción o Pirolisis	producto líquida	Turbinas	Energía eléctrica
		Hidrotratamiento	Gasolina y Diésel
		Mezclado	Slurries
Pirolisis	Producto sólido (CHAR)	Mezclado	Slurries
Gasificación o Pirolisis	Gas PCB	Motores	Energía eléctrica
		Síntesis	Metanol, Alcohol combustible y amoníaco
	Gas PCM	Turbinas	Energía eléctrica
		Motores	Energía eléctrica
		Síntesis	Metanol, Alcohol combustible
Fermentación	-	Hidrolisis y fermentación	Etanol
Digestión anaerobia	-	Fermentación	Biogás y lodo fertilizante orgánico

Fuente: [5].

Al momento de seleccionar el tipo de proceso o tecnología que se empleará para la transformación a energía, conocer la composición de los residuos es sumamente importante [7].

La digestión anaerobia es un proceso de carácter bioquímico utilizado para la producción de biogás a partir de la degradación de las partículas orgánicas biodegradables contenidas en los residuos sólidos orgánicos mediante la fermentación en ausencia de aire en la biomasa. Este biogás tiene la característica de tener un alto contenido en metano, gas de alto aprovechamiento energético. Adicional al proceso de degradación se genera dióxido de carbono, un residuo estabilizado o lodo fertilizante orgánico que tiene una alta tasa de destrucción de microorganismos patógenos y que puede ser utilizado como mejorador del suelo [8] y otros compuestos obteniendo así un balance energético positivo y una producción con un rango de potencia eléctrica de aproximadamente de 0,3-10 MW [1]. La reacción se representa mediante la siguiente ecuación [9]:



Materiales y métodos

La presente investigación es fundamentalmente de carácter cuantitativa, siendo su principal objetivo el calcular la valoración energética que podría derivarse del aprovechamiento de la biomasa procedente de los desperdicios de la Central de Abasto de Ecatepec de Morelos, Edo. De México.

Para el cálculo de este parámetro fue indispensable considerar un modelo matemático que se ajuste a las condiciones ambientales y al tipo de residuos específicos generados en el lugar de estudio.

$$Q_{\text{biogas}} = Mr \times EF \quad (1)$$

Q_{biogas} = Flujo esperado de gas

Mr = Material residual (kg/día)

EF = Factor de Emisión de CH₄ /kg de residuo tratado (0.15 m³/kg)

Este método fue desarrollado por el departamento de Ingeniería Química en la Universidad de Santander [10], se decidió utilizar por la semejanza que guardan las condiciones y los parámetros de ambos estudios. Como son el tipo y composición de los residuos orgánicos teniendo entre el 44 y 50% de componentes vegetal entre (fruta, flores y verdura), además de su procedencia ambos de centrales de abasto.

Los valores de las cantidades de residuos generados por cada local, de verdura 50 kg por día, los de frutas 30 kg y los de carne 20 a 25 kg fueron obtenidos directamente con los locatarios en la central de Ecatepec mediante una encuesta simple. El número de población (n) se calculó considerando la cantidad finita de negocios; igual a 700.

$$n = \frac{Z^2 p q N}{d^2(N - 1) + Z^2 p q} \quad (2)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

N = Población total (700)

Z = Distribución estándar para 95% de confianza (1.96)

p = Probabilidad de éxito (0.5)

q = Probabilidad de error (0.5)

$$n = \frac{1.96^2 \times 0.5 \times 0.5 \times 700}{0.1^2(700 - 1) + 1.96^2 \times 0.5 \times 0.5} \quad (3)$$

$$n = 84.56 \cong 85 \quad (4)$$

Por lo que la encuesta se aplicó a una muestra (n) representativa de 85 locatarios escogidos al azar de diferentes giros.

Por otro lado, para la selección del tipo de reactor se deben considerar otros parámetros como el tiempo de retención hidráulico, las fases de carga y descarga diaria y el tipo de materia prima [11], por lo que para esta investigación utilizará como referencia un reactor tanque semicontinuo alimentado con residuos sólidos orgánico en una concentración de solidos totales del 20% y a una temperatura promedio de 55°C para asegurar la mayor producción de biogás y eliminación de patógenos. Se considerará un tiempo de concentración hidráulico de 15 días, tiempo en el que la degradación anaerobia es total [12], para esperar obtener de este modo biogás con una concentración de entre un 50 y 70% de metano.

La gran ventaja de considerar un reactor semicontinuo es que todos los procesos necesarios para la obtención del biogás se realizan dentro de un mismo reactor, obteniendo así un alto rendimiento de producción, bajo coste, obtención de un fertilizante y una eficacia en cuanto al arranque y estabilización del digestor [13].

Resultados

En la Central de Abasto de Ecatepec se estimó se generan alrededor de 18 toneladas diarias de residuos de diferentes tipos, según los datos de la encuesta el 44% de ellos son de origen orgánico. A continuación, se presenta el cálculo del biogás que se produciría por la descomposición de los residuos dispuestos en un reactor tanque semicontinuo bajo condiciones ideales de trabajo.

Dada la producción de residuos diarias y considerando el porcentaje de materia orgánica que la compone, se tiene que:

$$\text{masa orgánica} = 18,000 \text{ kg} \times 0.44 = 7,920 \text{ kg diarios} \quad (5)$$

Considerando una disolución en agua del residuo y una alimentación del 20% [9], se obtiene lo siguiente:

$$Q_{\text{alimentacion}} = 7,920 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{100}{20} = 39,600 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad (6)$$

El cálculo diario de los sólidos totales obtenidos dentro del reactor, tomando en cuenta un valor de S.T.= 819 g/kg para el reactor los determinamos de la manera siguiente:

$$S.T. = 819 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 39,600 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} = 32,432.4 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad (7)$$

Se deben de considerar que de los sólidos una fracción se pierden por evaporación durante la digestión anaerobia [6], por lo que, para este estudio, tipo de reactor y dada la composición inicial se considera un valor de solidos volátiles del 52.93%, reduciéndose la masa al valor siguiente:

$$S.V. = 32,432.4 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0.5293 = 17,166.47 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad (8)$$

El siguiente paso fue calcular el porcentaje de reducción de los sólidos volátiles equivalente al 79.4% según lo reportado en pruebas experimentales del estudio original realizado en las Universidades Santander [10] y de América [15], en el digestor anaerobio.

$$\%Reduccion = 17,166.47 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0.794 = 13,630.17 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad (9)$$

Posteriormente se procede a calcular el volumen de metano generado por día en el proceso de conversión anaerobia. Sabiendo que el rendimiento de metano por cada kilogramo de materia orgánica genera aproximadamente 0.15 m³ de este gas [15], se tiene lo siguiente:

$$Q_{biogas} = 13,630.17 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0.15 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 2,044.52 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (10)$$

Como se sabe, el metano total que se genera dentro del reactor no es 100% recuperado [9], sin embargo, estos reactores tienen una eficiencia de recuperación alta de aproximadamente 60% [14], de esta forma el volumen de metano disponible para su utilización se calcula de la manera siguiente:

$$Eficiencia = 2,044.52 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 0.60 = 1,226.71 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de } CH_4 \quad (11)$$

Finalmente, para calcular el poder calorífico y potencia de dicho volumen de metano a presión atmosférica 1atms y a 25 °C se realiza con lo siguiente:

$$Poder \text{ calorífico} = 1,226.71 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de } CH_4 \times 8,708.4 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3} = 10,682,732.72 \frac{\text{Kcal}}{\text{día}} \quad (12)$$

$$Potencia \text{ eléctrica} = 517.67 \frac{\text{kW}}{\text{h}}$$

Análisis de resultados

La generación de residuos orgánico en centros de abasto tanto en nuestro país como en Colombia mantienen ciertas semejanzas entre las condiciones y los parámetros de ambos sitios se tiene particularmente que para Bogotá en CORABASTOS se generan 8,680 tons año de residuos orgánicos [15] la mayor parte de los residuos vegetales son; espinaca, remolacha, tomate, apio, calabaza y los de frutas uva sandía piña, melón, mango [15]. En la presente valoración se ve una condición similar para la central de abastos de Ecatepec que se calculó genera 18 tons al día (equivale a 6 570 por año) de estos el 44% (2,890.1 tons anuales) son residuos orgánicos de verdura, como tomate, coliflor, pepino calabaza, lechuga; los de fruta (naranja, plátano, mango, piña, sandía) y los de carne (viseras, hueso y también residuos de comida preparada) En otro estudio [14] calcularon para la central de Ecatepec 3,6 tons al año de residuos orgánicos, siendo ambos cálculos sumamente próximos. En los tres casos se pone de manifiesto una generación equivalente en la masa de la fase orgánica, y una composición similar entre Colombia y Ecatepec tal vez determinada por las practicas agroforestales de las regiones a las que pertenecen y por los patrones de consumo, que les hacen compartir fuertes vínculos alimenticios.

Cuadro 2. Comparación de las características físicas consideradas en la valoración energética de la biomasa procedente de los desperdicios en centros de abasto, España [16] y el caso de estudio Ecatepec (México).

Parámetros	España	Ecatepec
Humedad (%)	72	28.98
ST (%)	28	81.9
SV (%)	24	52.93
Biometano generado (día)	397 (dm ³ /kgSV)	122.6 (dm ³ /kg biomasa)

De donde se observa que la fase orgánica del presente estudio guarda un escaso nivel de agua, muchos más sólido, con un menor rendimiento metanogenico probablemente asociado a materiales con una mayor proporción de lignina.

En cuanto a las necesidades de energía eléctrica en la central de abastos de Ecatepec por las 7 naves y la iluminación exterior se estima un total de carga demandada de 9,910.28 kWh en un día aproximadamente, esta demanda es igual al consumo de los locatarios que pagan individualmente la energía [14], pero cabe señalar que una parte de los comerciantes no tiene un medidor y se encuentran colgados al alumbrado público. La valoración energética de los residuos orgánicos en el presente análisis para la central de abastos de Ecatepec estimo que se cubriría al menos el 53.8% de la demanda por día calculada exclusivamente para la nave de frutas y verduras, que de acuerdo con Cuevas Galvan y Tellez Reyes [14] tiene una carga de demanda total de 962.2 kWh diaria. Si bien no equivale al 100% dichos cálculos son importantes para demostrar que existe un mejor destino para los residuos orgánicos que el deposito en un relleno sanitario donde solo contribuirían a incrementar la carga de gases de efecto invernadero.

En el Mercado Mayorista de Frutas N°2 del distrito de La Victoria, para evidenciar el potencial energético de los residuos generados a partir del comercio de fruta al mayoreo, se realizó una encuesta con 87 puestos, resultado de ello se caracterizó al comerciante y se recabo información acerca de la cantidad de energía que consumen 2,337.94 kWh y la cantidad de residuos orgánicos promedio que desechan al día, siendo de 6,111 kg, para lo cual se calculó el potencial energético diario y el resultado fue de 257.10 kWh [17]. Para el caso de estudio el valor de (n) la muestra fue 84 locales, resultando de la encuesta que generan aproximadamente 7,920 kg diarios de residuos orgánicos con una valoración energética calculada que arrojo un potencial eléctrico de 517.67 kWh el doble de lo referido para la Victoria (Perú) diferencia que de manera particular posiblemente sea explicada por la composición y carga total de la fase orgánica generada en cada región.

Conclusiones

La potencia eléctrica disponible de las 18 toneladas de residuos generados diarios asumiendo que se parte de los 84 locatarios participantes de la Central de abasto de Ecatepec y los residuos que se estimó generan la valoración energética obtenida de 517.67 kWh, si bien no sería suficiente para satisfacer completamente el total de la demanda energética de la central 2,337.94 kWh, la utilización de biorreactores mediante el aprovechamiento de la biomasa representaría el 22% un gran paso en la implementación de sistemas verdes autosuficientes y la explotación de las energías verdes, además de la concientización e impacto socioeconómico.

Existen diversas alternativas que se pueden emplear para lograr cubrir la demanda energética de la zona de estudio como abastecer de residuos el reactor también con materia proveniente de colonias aledañas. Cabe destacar que aunado a la producción del biogás se generarían

subproductos de gran importancia como el abono que puede ser distribuido fácilmente en puntos de importancia agrícola como los establecidos en Acolman, municipio colindante a Ecatepec de Morelos.

Referencias

- [1] S. Noguez, D. García, A. Rezeau "Energía de la biomasa", 2010, Vol. II, C. d.-S. renovables, Ed. Zaragoza, España: Presas Universitarias de Zaragoza.
- [2] H. Escalante, J. Ordaz, J. Zapata, H. J. Cardona, M. C. Duarte, "Atlas de potencial energetico de la biomasa residual en Colombia, Bogota", 2011, <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>
- [3] L. Rodríguez "Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana", 2015, *Energética*, 0(46), 23–28.
- [4] C. C. Serrato, V. Lesmes "Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca", 2016 [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/>
- [5] P. A. Della Rocca, "Estudio de procesos de conversión térmica de biomasa", 1998, *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*. Universidad de Buenos Aires, http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3033_DellaRocca.pdf
- [6] F. Monnet "An introduction to Anaerobic Digestion of organic wastes", 2003, Final Report, Escocia.
- [7] M. Muñoz "Modelo de gestion limpia para solidos municipales", 2004, Quito, Ecuador.
- [8] L. De Baere. "Anaerobic Digestion of Solid Waste: State of the art", 2000. *Science Technology*(41), 283-290.
- [9] H. Asis, F. Dopazo, P. Gianoglio "Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos", 2006, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco.
- [10] Escalante Hernández, H., et al (2012). Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia. [Electronic (1)]: Unidad de Planeación Minero Energética, UPME; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam; Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias; Universidad Industrial de Santander, UIS ed. Colombia: 141 p Disponible en Internet <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>>Biomasa/Anexo_B_Muestreo_caracterizacion_biomasa_residual.pdf
- [11] Y. González, T. Gato, L. Pires "Determinación del Potencial energético de los Residuos Sólidos Urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda", 2015, *Tecnología Química*, Angola. 35(1), 63–72.
- [12] A. Wilkie "Anaerobic digestion: biology and benefist", 2013, Dairy Manure Management Conference. Florida, EEUU. 12 p.
- [13] Universidad Mayor de San Andres "Aprovechamiento de los residuos del proceso anaerobico", 2009, Proyecto CNI-IIIDEPROQ, La Paz, Bolivia, 100 p.
- [14] Cuevas Galvan J, TéllezReyes P. (2016) "Factibilidad de un sistema de obtención de biogás para la generación de energía eléctrica en la Central de Abastos de Ecatepec", Tesis Lic, ESIME, Instituto Politécnico Nacional.
- [15] García Rodríguez A. M. y Gómez Franco J. D., (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la Central de Abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Universidad de América. Fac. de Ingría. Tesis de Lic. Programa de Ingeniería Química. Bogotá. Disponible en internet <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>
- [16] Sánchez Nocente E. (2021) Análisis del potencial de obtención de biometano en España y Evaluación del impacto ambiental asociado a su proceso de producción. Tesis de Maestría. Univ Politécnica. Ingría Industrial. Disponible en internet https://oa.upm.es/66146/1/TFM_EDUARDO_SANCHEZ_NOCETE.pdf
- [17] Anchayhua Chate B.C.A y Toribio Soca F.J. (2020) Potencial energético de los residuos orgánicos generados en el mercado mayorista de fruta N°2 en el distrito de La Victoria. Univ. San Ignacio de Loyola. Tesis de Lic Lima. Perú disponible en internet: <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8caa58f1-3c1a-434d-96cf-245ea0814e52/content>

Análisis de flujos hidrodinámicos bidimensionales en superficies de los taludes del trópico

Analysis of two-dimensional hydrodynamic flows on tropic slope surfaces

Ronald Andrés Rodríguez-Poltronieri¹, David Borge-Leandro²

Fecha de recepción: 16 de agosto, 2022

Fecha de aprobación: 29 de octubre, 2022

Rodríguez-Poltronieri, R.A; Borge-Leandro, D. Análisis de flujos hidrodinámicos bidimensionales en superficies de los taludes del trópico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 76-93.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6365>

1 Universidad Fidélitas. Costa Rica. Correo electrónico: rpoltro2310@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7275-5977>

2 Universidad Fidélitas. Costa Rica. Correo electrónico: dborge80034@ufide.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

Palabras clave

Hidrodinámica; escorrentía superficial; erosión; cambio climático; taludes; vegetación nativa.

Resumen

Pocos estudios reflejan los comportamientos hidrodinámicos de los flujos superficiales en taludes del trópico, a pesar de la cantidad de herramientas de modelación con las que se cuenta en la actualidad. La presente investigación es un aporte que ayuda a incrementar los conocimientos de la dinámica de las escorrentías en los taludes, como un estudio extra de los comportamientos de las precipitaciones sobre estos. Los análisis realizados toman relevancia dentro de los estudios básicos de un proyecto, desarrollándose dentro de las disciplinas de hidrodinámica, geología y ambiental.

El caso estudiado se ubica en un talud del sector de Cervantes, el cual ya fue intervenido con una malla de acero de doble refuerzo como un control erosivo superficial. Con la investigación se realiza una comparativa de obras aplicadas y una nueva propuesta sostenible mediante herramientas de modelación bidimensional.

Los modelos reflejan el comportamiento de las velocidades de flujo en general y puntual debido a la distribución en un talud, se realizó una comparación de sus velocidades de flujo en tres escenarios, teniendo una disminución de 33,73% hasta 48,88% en las velocidades de flujo de la cobertura propuesta, tanto para eventos de periodo de retorno de 50 y 100 años. Además se analizó un efecto de cambio climático, que verifica que las velocidades no superen los límites de arrastre teóricos de finos para el modelo propuesto y en cuyo caso se cumplió a cabalidad. Como control de escorrentía, la cobertura propuesta cumple su función, sin embargo por las condiciones particulares del talud analizado la propuesta se desempeña como un complemento de las medidas aplicadas.

Keywords

Hydrodynamics; surface runoff; erosion; climate change; slopes; native vegetation.

Abstract

Few studies reflect the hydrodynamic behavior of surface flows on slopes of the tropics, despite the number of modeling tools currently available. The present investigation is a contribution that helps to increase the knowledge of the dynamics of the runoff on the slopes, as an extra study of the behavior of the precipitations on these. The analyzes carried out take relevance within the basic studies of a project, developing within the disciplines of hydrodynamics, geology and environment.

The case studied is found on a slope in the Cervantes sector, which has already been intervened with a double-reinforced steel mesh as a superficial erosive control. With the research, a comparison of applied works and a new sustainable proposal are made using bidimensional modeling tools.

The models reflect the behavior of the flow velocities in general and specific due to the distribution on a slope, a comparison of their flow velocities was made in three scenarios, having a decrease of 33.73% to 48.88% in the flow velocities of the proposed coverage, both for events with a return period of 50 and 100 years. In addition, a climate change effect was analyzed, which verified that the flow speeds do not exceed the theoretical drag limits for the proposed

model and in which case it was fully complied with. As runoff control, the proposed coverage fulfills its function. However, due to the particular conditions of the analyzed slope, the proposal works as a complement to the applied measures.

Introducción

La modelación hidrodinámica es una herramienta útil para identificar el comportamiento de las escorrentías superficiales, producto de las precipitaciones. Estos modelos tienen muchas aplicaciones para determinar llanuras de inundación, así como para determinar flujos en canales y puentes, el trabajo toma los principios de la hidrodinámica y los aplica en taludes con problemas de erosión superficial; como indica [1] los modelos computacionales tanto numéricos como gráficos, contribuyen como herramienta de análisis y predicción de condiciones del entorno, para la toma de decisiones y solución de problemas de ingeniería.

La zona norte de Cartago es un sitio con suelos de características erosivas, como indica [2] los suelos de este sector debido a condiciones topográficas, al sobre uso generalizado y frecuentes lluvias de alta intensidad, se ven afectados y desgastados. Por lo que es usual que sus superficies tiendan al desgaste y la exposición de otros estratos inferiores. Dichas condiciones de los suelos de la zona se presentan en un talud de Cervantes de Cartago, camino a la casa de máquinas de la planta hidroeléctrica Birrís, donde encontramos un talud ya intervenido por una malla de acero reforzado MINAX, diseñada por la empresa GEOBRUGG.

El control erosivo funciona como una opción viable, sin embargo la investigación comprobó las condiciones del talud antes de la intervención, las actuales y las probables, con un modelo de control erosivo sostenible. La opción seleccionada de sistema de control erosivo es la revegetación del sitio, ya que como menciona [3], los efectos hidrológicos de la vegetación sobre los taludes colaboran modificando aspectos como la rapidez del flujo por la aspereza, la función de infiltración y evapotranspiración. Las condiciones anteriores están ligadas al tipo de vegetación que se implemente en la zona y el espécimen específico. La selección debe no solo disminuir la erosión del talud, sino además proteger las condiciones medio ambientales del sitio. Para ello se basa la escogencia de la especie vegetal, en los aspectos bioclimáticos del sitio, [4]; tomó la influencia de condiciones edafológicas, climatológicas y biológicas, de esta manera produciendo correlaciones de la fisonomía de una zona con otra, para así asociar las especies vegetales y poder hacer uso de ellas sin perjudicar los micro climas; manteniendo el equilibrio de las condiciones en suelos foráneos.

Con base en la clasificación de zonas biológicas del país, [5] determinó una guía de estabilización de taludes en los suelos de Costa Rica utilizando vegetación nativa; implementando fichas técnicas del INBio para así definir cada espécimen empleando parámetros de altitud y temperatura, por lo que se tienen un rango amplio de especímenes de vegetación para control erosivo.

Basado en las clasificaciones

El análisis propuesto estudió los comportamientos del flujo de escorrentía, haciendo una comparativa con velocidades permisibles, aunado a esto se plantean tres escenarios comparativos la condición sin intervención (escenario 1), la aplicación de la malla MINAX por GEOBRUGG (escenario 2), la aplicación de vegetación nativa como propuesta (escenario 3) y un escenario bajo efectos de cambio climático (escenario 4) que verifica si la propuesta resiste eventos de este tipo. Es importante estudiar las velocidades de flujo para cada escenario, ya que determinan si existe o no arrastre y cuál de todos ellos es el más óptimo. Para cada modelo se determina la rugosidad a implementar estudiando los usos de suelo y/o la cobertura de la superficie que se está trabajando.

Las precipitaciones de análisis para la investigación, surgen de datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y se estiman por métodos estadísticos de Gumbel y el test de Kolmogorov-Smirnov, empleados por la misma institución para determinar las precipitaciones máximas para los periodos de retorno de 50 y 100 años, las intensidades para las curvas de intensidad duración y frecuencia emplean el método Dick Peschke mencionado por [6] para su cálculo.

La importancia de los modelos hidrodinámicos como menciona [7] explica como este modelo numérico permite obtener conocimientos puntuales sobre los comportamientos del flujo del agua, generando representaciones espaciales para la solución de problemas con respecto al recurso hídrico, es esta herramienta una necesidad para la preservación del medio ambiente y el desarrollo económico, lo que permite tener un alto rango de precisión con respecto a la dimensión del problema que se desea abarcar y por ende, permite obtener o idear soluciones más precisas.

El objetivo general para este informe fue; Analizar un talud por medio de modelos hidrodinámicos bidimensionales para emplear controles erosivos con vegetación nativa en Santiago de Cervantes, Cartago. Como objetivos específicos se tienen; (1) Contrastar los efectos de las medidas aplicadas en el talud contra la condición expuesta del mismo, por medio de modelos hidrodinámicos de flujo de escorrentía para periodos de retorno de 50 y 100 años; (2) evaluar la diferencia de los flujos de escorrentía entre las medidas empleadas en el talud y la aplicación de vegetación nativa como control erosivo sostenible para periodos de retorno de 50 y 100 años; (3) verificar el comportamiento del sistema de control erosivo sostenible ante un evento de cambio climático.

Materiales y métodos

El sitio se encuentra cerca de la desembocadura del río Birrís, carretera a la planta hidroeléctrica con el mismo nombre, dicha cuenca pertenece a la vertiente norte del río Reventazón que nace en el parque nacional Volcán Irazú, el cuerpo de agua recorre los cantones de Oreamuno Y Alvarado. Según [8], las actividades agrícolas y ganaderas han generado la degradación y facilidad erosiva de los suelos de la zona, siendo esta subcuenca la contribuyente del 16% de los sedimentos de la cuenca del río Reventazón a pesar de ser solo el 5% de la superficie de esta.

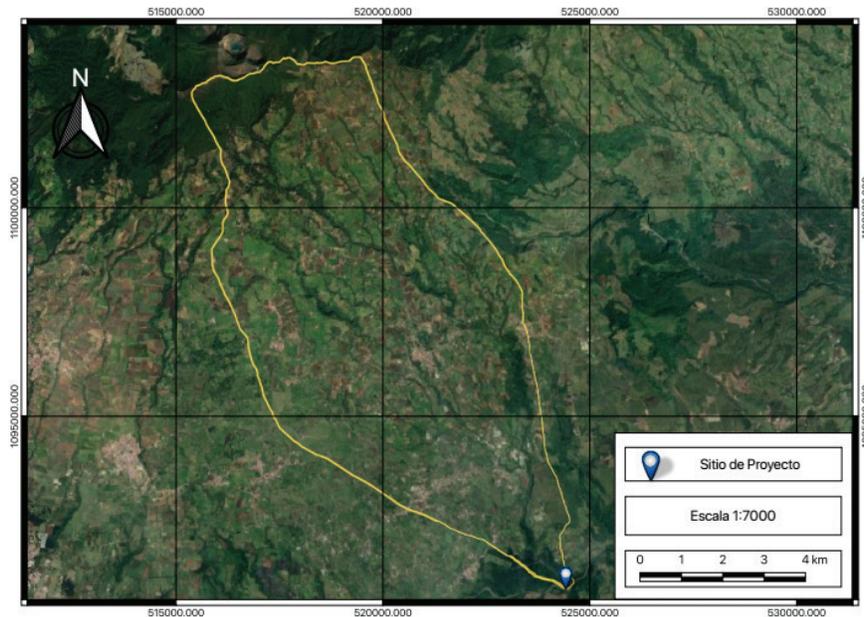


Figura 1. Cuenca del Río Birris y ubicación del proyecto.

La investigación se desarrolla dentro del paradigma científico, enfocando parte de esta en los tipos aplicada científica y cuantitativa, se desarrollan los conocimientos teóricos de ramas como la ingeniería ambiental, geotecnia, hidrología e hidrodinámica. Debido a las condiciones del trabajo el alcance es del tipo correlacional, comparando velocidades y asperezas en la superficie estudiada y correlacionando los datos obtenidos con parámetros teóricos de erosión por usos de suelos.

Las fuentes primarias de información son los mapeos por medio de aeronaves no tripuladas y levantamientos con LIDAR, los cuales permiten tener un archivo de modelo de elevación digital para analizar flujos con un nivel de exactitud mayor. Este levantamiento es clave para determinar la red de drenajes del talud, la pendiente, inclinación, así como los posibles caminos de recorrido de las precipitaciones en el talud, la herramienta Global Mapper permite trabajar con estos archivos y determinar las características antes mencionadas. Además con esta herramienta se estudia características similares para la cuenca en general, obteniendo parámetros de pendiente, hipsometría, densidad de drenajes y compacidad que para efectos de la investigación permite obtener datos iniciales sobre el comportamiento erosivo a nivel macro. Como parte de los insumos se contrataron ensayos de suelos a nivel superficial en el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, que determinan las propiedades físicas y de capacidad hidráulica del talud.



Figura 2. Muestreo de suelos para ensayos de propiedades físicas y de conducción hidráulica.

Después de trazar la cuenca del río Birrís se determina por medio de las estaciones de lluvia del IMN en el Atlas 2014 los polígonos de Voronoi para la superficie estudiada. Para ello se emplea la herramienta QGis y se observa que hay dos posibles estaciones de las cuales se pueden obtener intensidades de análisis. Con dicha información se solicitó al IMN los datos de la estación de lluvia de 73-115 Capellades Birrís; ya que, dicha estación es la que afecta directamente el proyecto. Para determinar las intensidades de lluvia se emplea el método de Gumbel para las precipitaciones máximas diarias de los últimos 11 años, la herramienta Hydrognomon calcula una curva logarítmica de probabilidad de eventos de precipitación para diversos periodos de retorno con un nivel de excedencia entre los 8% y 93%, la prueba de bondad de Kolmogorov- Smirnov determina el método de mejor ajuste con un nivel de aceptación de un 5%, en el que Gumbel cumple a cabalidad. El método de Gumbel permite obtener precipitaciones diarias máximas para diversos periodos de retorno y con el método de Dick Peschke se determinan finalmente las intensidades de lluvia para diferentes duraciones de tormenta y periodos de retorno.

Las intensidades sirven para calcular los hidrogramas unitario sintéticos triangulares del SCS, cuyos caudales son parámetros de entrada en los modelos hidrodinámicos bidimensionales. Las intensidades se verán afectadas por la capacidad de infiltración de los suelos, basados en los resultados del muestreo de campo la condición de conducción hidráulica saturada para un suelo de 53% de saturación, por lo que se contempla una capacidad de absorción del suelo de 47%, esto disminuye la escorrentía producto de las intensidades calculadas.

La metodología final implica el uso de la herramienta Iber 2.4.3 para el modelo hidrodinámico de las escorrentías en el talud, primero se determina los escenarios que se van a modelar, se necesita la rugosidad del suelo antes de ser intervenido, la rugosidad del suelo una vez aplicadas las medidas de control de escorrentía de la malla MINAX y la rugosidad de la propuesta de control de erosión sostenible; finalmente se desea verificar este modelo propuesto para un evento de cambio climático. Los primeros tres escenarios se corren empleando un caudal de periodos de retorno de 50 y 100 años con la capacidad de los suelos al 53% de saturación, mientras el modelo de cambio climático se trabaja con suelos saturados al 100% por lo que las escorrentías aumentan para el último caso.

Se aplica a la superficie del talud una malla RTIN en la herramienta IBER 2.4.3 con triángulos de 30 cm, esto permite una mayor exactitud en el flujo, seguidamente se le da elevación al mallado para tener una vista de 3 dimensiones del talud como se aprecia en la figura 3.

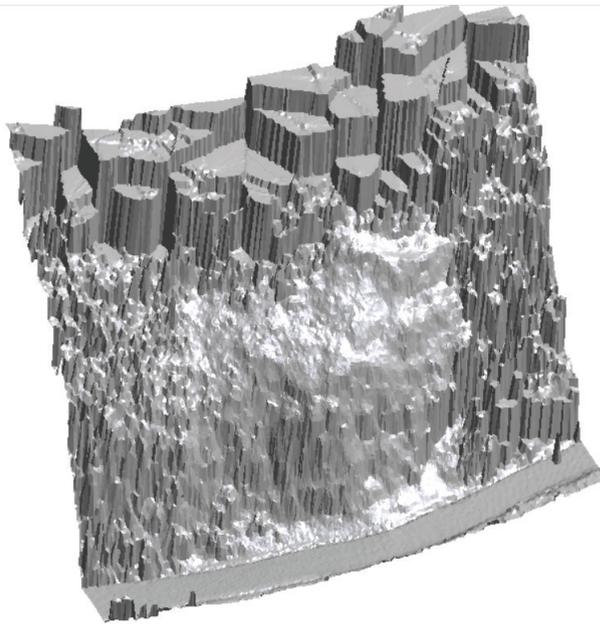


Figura 3. Modelo de elevación digital.

Finalmente la investigación adquiere un enfoque alternativo entre lo cuantitativo y cualitativo, ya que viene de lo general a lo específico recolectando datos, pero con la necesidad de interpretación de estos con criterio ingenieril. Definiendo por medio de las áreas de colores suavizadas, las velocidades críticas y la duración de las mismas; para así, realizar una comparativa contra velocidades teóricas y definir si existe o no erosión superficial para cada escenario.

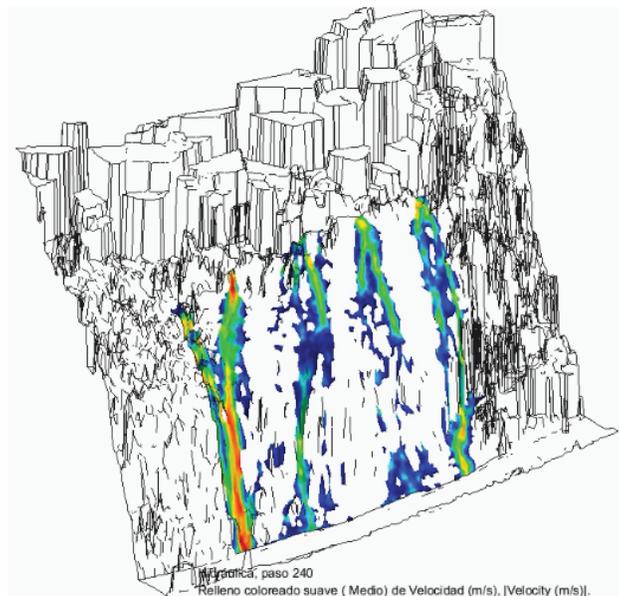


Figura 4. Modelo con áreas de colores suavizada.

Resultados

Morfometría de la Cuenca

Se determinaron parámetros morfométricos para analizar la capacidad erosiva de la cuenca y así obtener las capacidades del suelo y susceptibilidad a la erosión, como datos iniciales, previo a una investigación más específica. Dentro de los parámetros de forma se obtuvieron los siguientes:

Cuadro 1. Características y Parámetros de la cuenca.

Área (km ²)	63,8
Perímetro (km)	36
Índice de compacidad	1,26
Altura (m)	2370
Longitud (m)	20530
Pendiente (m/m)	0,12
Longitud de Streams (km)	465,225
Densidad Drenajes (km/km ²)	7,29

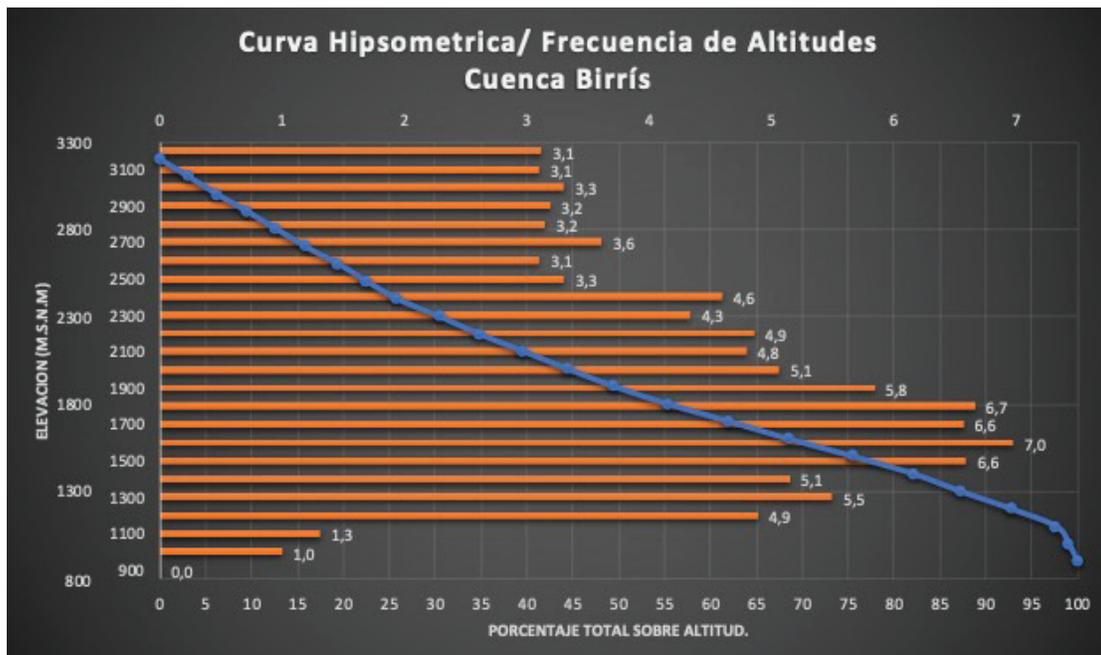


Figura 4. Curva Hipsométrica de la cuenca.

La cuenca tiene forma oval u oblonga según indica el índice de compacidad, se cuenta con un criterio moderado de concentración de volúmenes de escorrentía. Se tiene una pendiente promedio del 12%, con una destacada sinuosidad en pequeños tramos producto del desarrollo humano de la zona.

La densidad de drenajes es alta para el tipo de cuenca y su tamaño, esto refleja que los flujos de escorrentía pueden ser rápidos, estando en presencia de suelos erosivos o impermeables.

La curva hipsométrica indica una etapa de madurez, por lo que se tiene gran arrastre y depósito de sedimentos, esto explica el gran aporte de sedimentos que realiza al río Reventazón.

Morfometría del Sitio

El sitio de estudio ubica un talud con varias características; se compone de un conglomerado de suelo y roca, este ya cuenta con intervención de malla de acero de doble refuerzo, con funciones de control de erosión y retención. Dentro de los parámetros que se destacan para el sitio se tienen los siguientes:

Cuadro 2. Características y Parámetros de la cuenca.

Área (m ²)	360
Perímetro (m)	80,3
Cota Máxima (m)	902,5
Cota Mínima (m)	872
Long Talud (m)	28,10
Pendiente Promedio (m/m)	1,78
Angulo de inclinación (°)	60,68
Pendiente Promedio de Streams (m)	29,24

Los parámetros del talud en cuestión, funcionan como parámetros de entrada para otros cálculos en la investigación. El cálculo de hidrogramas se realiza gracias al área de la zona, las cotas mínima y máxima permiten determinar la altura por donde recorre el agua. La pendiente promedio de los streams, colabora en el mismo cálculo, ya que nos da el recorrido de gota sobre la superficie del talud.

La pendiente del talud, así como su inclinación nos permite tener noción de que tipo de cobertura vegetal se puede implementar, los pastos son vegetaciones que soportan pendientes bastante altas, como las que refleja el sitio.

Tipo de Suelo

Según los estudios realizados, se tiene un suelo con textura tipo franco arcilloso arenoso. Las muestras tomadas se realizaron a 15 cm por debajo de la capa orgánica, dichas muestras funcionan como base para determinar la rugosidad del primer y segundo escenario. Además de contribuir a la disminución de precipitaciones dada su característica porosa y permeable, dato analizado según su humedad y conductividad hidráulica saturada.

El talud presenta una textura de material del tipo franco arcilloso arenoso con 56 % de arena, 23 % limo y 22 % arcilla y del porcentaje de arenas se tiene 21 % de arena gruesa, 16 % arena media, 10 % arena fina y 9 % arena muy fina [9].

Cuadro 3. Límites de Atterberg suelo franco arcilloso arenoso.

Límites de Atterberg	% g/g
Límite Plástico, LP	63,3 ± 1,14
Límite Líquido, LL	71,2
Índice de plasticidad, IP	7,9

Cuadro 4. Densidad aparente y contenido de humedad de la muestra.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad Aparente	0,73	g/cm ³
Porosidad Total	72	%
Humedad Gravimétrica	53	%
Humedad Volumétrica	38	%
Conductividad Hidráulica Saturada	49,05	cm/h

Fuente: [9].

Caudales de Análisis

La estación del Instituto Meteorológico Nacional que afecta el sitio de estudio según los polígonos de Voronoi de la cuenca corresponde a la estación de lluvia Capellades Birris.

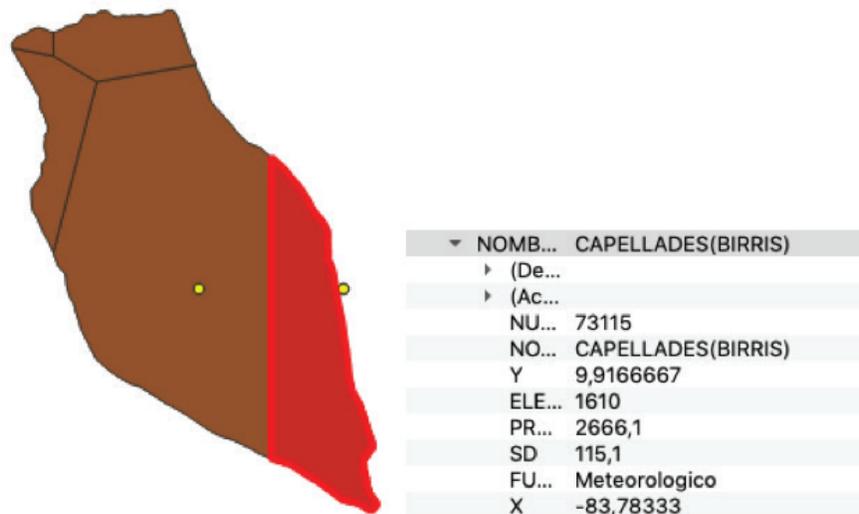


Figura 5. Estación de lluvia del sitio en estudio, por Polígonos de Voronoi.

Por su parte los datos obtenidos de la estación de lluvia se clasificaron para obtener la máxima precipitación anual, la distribución logarítmica de Gumbel, fue la que mejor se adaptó a los datos suministrados. Los datos se encuentran dentro del nivel de aceptación del test de Kolmogorov-Smirnov, además de cumplir el valor de confianza en un 95%.

Cuadro 5. Intensidades de lluvia en mm/h para análisis.

Duración (min)	Periodos de Retorno (años)						
	5	10	25	50	100	250	500
5	333,20	372,04	421,12	457,53	493,67	541,25	577,18
10	198,12	221,22	250,40	272,05	293,54	321,83	343,19
15	146,17	163,21	184,74	200,71	216,57	237,44	253,20
30	86,92	97,05	109,85	119,35	128,77	141,18	150,56
60	51,68	57,70	65,32	70,96	76,57	83,95	89,52
120	30,73	34,31	38,84	42,19	45,53	49,92	53,23

Los caudales de análisis son el resultado de hidrogramas sintéticos, [10] los describe como una conformación de hidrogramas unitarios de diversos puntos dentro del área de drenaje o cuenca, que tiene como respuesta un caudal en un punto específico a partir de la información de lluvia.

Gráficamente se puede visualizar otros aspectos del comportamiento de las escorrentías, por medio de los hidrogramas unitarios triangulares; estos fueron desarrollado por Mockus y utilizados por SCS (Soil Conservation Service), el cual representa gráficamente valores como caudal punta, tiempo base, el tiempo punta en el que desarrolla dicho caudal, además tiempo de retraso y de concentración [11].

Para los periodos de retorno de análisis de 50 y 100 años con una duración de tormenta de 30 minutos, se tienen intensidades de precipitación de 119,35 y 128,77 respectivamente y para la intensidad bajo efecto de cambio climático se toma un incremento del 18% de la intensidad para el periodo de 100 años, lo cual representa un 151,94 .

Para efectos de cálculo de los hidrogramas y sus respectivos caudales se establece que por efectos de la permeabilidad encontrada en los suelos se debe reducir sus precipitaciones en un 47% por lo que para los periodos de retorno de 50 y 100 años tenemos 63,26 y 68,25 respectivamente, para la intensidad de cambio climático se mantiene la misma precipitación simulando la condición más crítica que puede presentar el sitio.

Cuadro 6. Caudales de análisis para los diferentes Periodos de Retorno.

Periodo de Retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Caudal (m ³ /s)
50	63,26	0,0556
100	68,25	0,06
100 + 18%	151,94	0,1335

Vegetación

La intercepción de las gotas de lluvia depende de la intensidad de la precipitación y el tipo de vegetación, esto impide el impacto directo sobre el suelo, derivando otros efectos como la retención del agua en el follaje, evapotranspiración por absorción, disminución del flujo por acumulación, drenaje por el follaje, goteo y aumento de infiltración [12].

Para obtener una vegetación para el sitio se tomaron en cuenta características del entorno del sector. Por el tipo de inclinación se definió pasto como la vegetación apta debido a su topografía, para definir que tipo de pasto no afectaría el micro clima de la zona se implementaron las zonas de vida de Holdridge. Usando la precipitación anual de la zona que indicaba la estación de lluvia y tomando en cuenta la altitud del sitio, se llegó a obtener dos posibles zonas de vida, para las cuales el espécimen Pennisetum Purpureum (Pasto Elefante) coincidía en ambas zonas.

Cuadro 7. Zonas de vida de Holdridge del sitio.

Código	Descripción	Temperatura en (C°)	Altitud (msnm)
Bp-MB	Bosque pluvial montano bajo	Entre 18 y 12	400-2800
Bmh-P	Bosque muy húmedo premontano	Entre 24 y 18	0-2000

Rugosidad

El análisis se define por medio de escenarios de diferentes rugosidades, éstas fueron definidas a partir de las condiciones del suelo, en cada estado del talud. Las rugosidades son producto de correlaciones para los suelos clasificados y las coberturas vegetales propuestas. Como indica [13], los coeficientes de rugosidad de Manning funcionan para diferentes tipos de canales con y sin mantenimiento, como un dato de diseño y análisis de las superficies por donde fluye agua. Este coeficiente es parámetro de entrada para los modelos en cada escenario.

Cuadro 8. Rugosidades por escenarios.

Escenario	Descripción	T (años)	Rugosidad (manning)
1	Suelo Franco arcilloso arenoso	50, 100	0,023
2	Suelo desnudo (malla acero)	50, 100	0,03
3	Cobertura vegetal media	50, 100	0,08
4	Cobertura vegetal densa	100 + 18%	0,12

Modelos hidrodinámicos de flujo de escorrentía superficial

A continuación se presentan las velocidades críticas observadas para cada escenario y la velocidad de arrastre límite.

Cuadro 9. Velocidades críticas escenario 1.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	0,61	2,42	4,37
100	0,61	2,01	3,62

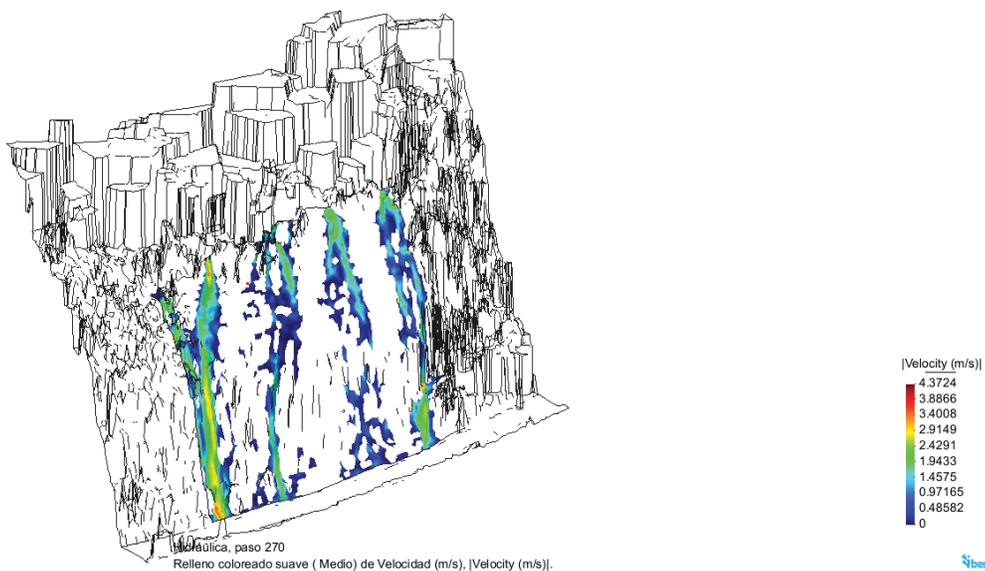


Figura 6. Punto crítico de escenario 1.

Cuadro 10. Velocidades críticas escenario 2.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	1,52	2,23	3,35
100	1,52	1,85	3,32

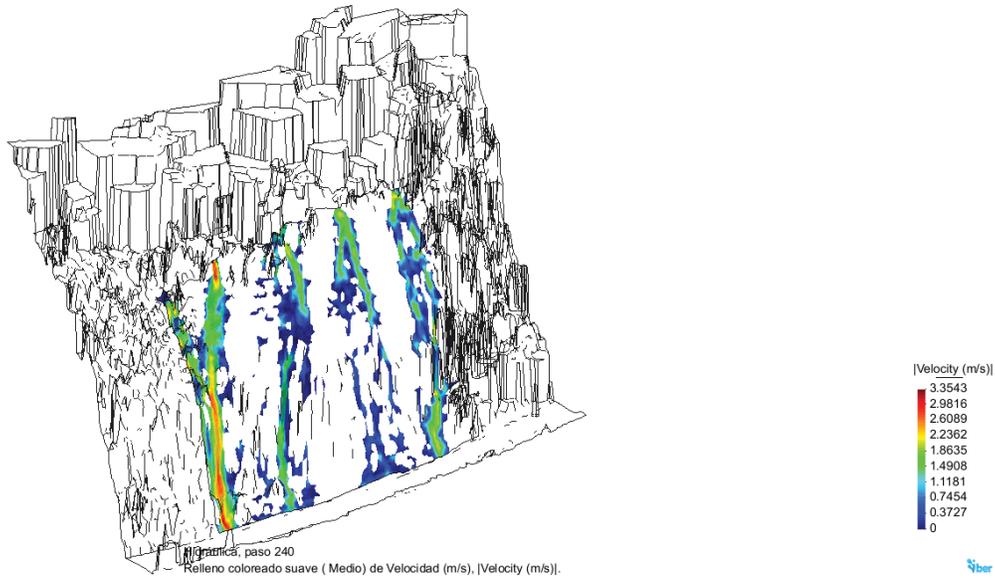


Figura 7. Punto crítico de escenario 2.

Cuadro 11. Velocidades críticas escenario 3.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	1,20-2,50	1,14	2,06
100	1,20-2,50	1,22	2,20

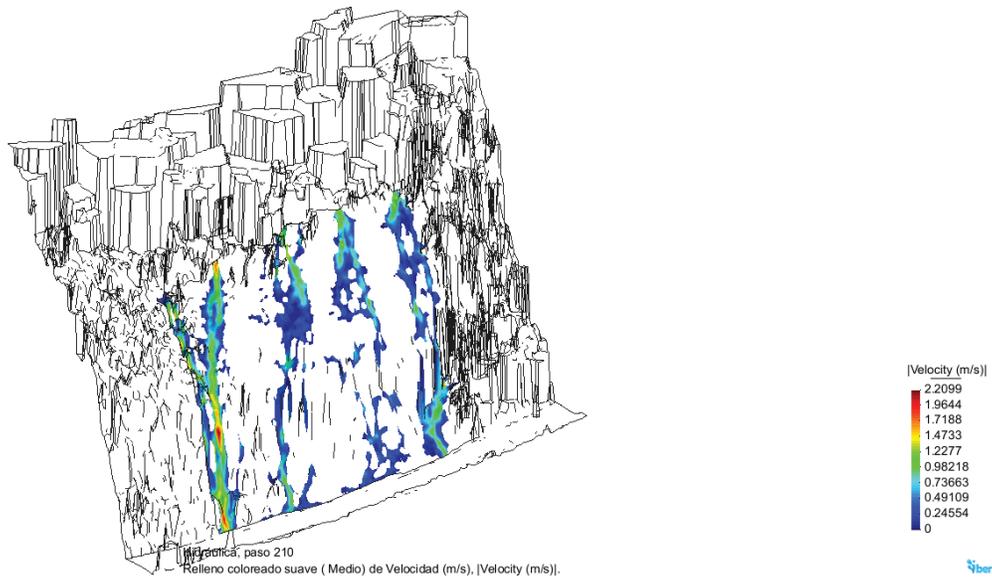


Figura 8. Punto crítico escenario 3.

Cuadro 12. Velocidades críticas escenario 4.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
Cambio Climático	2,00-5,00	1,16	1,56

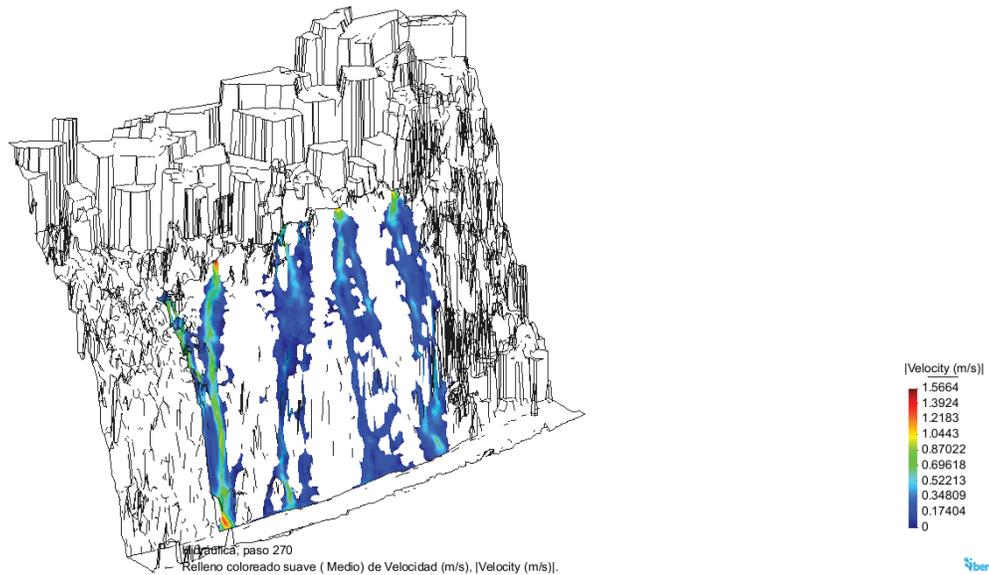


Figura 9. Punto crítico escenario 4.

De los cuadros presentados anteriormente se toma las velocidades de cada escenario para realizar una comparativa entre las etapas de cada uno y los periodos de retorno de las tormentas escogidas.

Cuadro 13. Comparativa escenarios 1 y 2 T50 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
1	2,42	4,37
2	2,23	3,35

Cuadro 14. Comparativa escenarios 1 y 2 T100 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
1	2,01	3,62
2	1,85	3,32

Cuadro 15. Comparativa escenarios 2 y 3 T50 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
2	2,23	3,35
3	1,14	2,06

Cuadro 16. Comparativa escenarios 2 y 3 T100 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
2	1,85	3,32
3	1,22	2,2

Discusión

Tanto como para los periodos de retorno de 50 y 100 años se tienen velocidades de arrastre considerables debido al tipo de suelo del sitio. Para un mismo uso de suelo se observa una diferencia en el comportamiento de los flujos de un periodo de retorno a otro, sin embargo es un dato poco esperado.

Las velocidades en el periodo de retorno de 100 años tienden a disminuir, pero no así la distribución de las escorrentías que tiende al aumento por el talud, debido a que otros sectores toman el excedente del caudal. Debido a esto se encontraron velocidades de flujo mayores en periodos de retorno menores.

Las velocidades puntuales tienden a ser mayores que en el resto del talud, al comportarse de esta forma se analizó dos condiciones una puntual y otra general, para así tener más claro los resultados. Enfocarse en velocidades puntuales puede ser un error debido a que el resto de las áreas posee velocidades que pueden exceder las condiciones límites y pueden llegar tener una mayor importancia.

De los modelos de escorrentía superficial para suelo franco arcilloso arenoso, podemos afirmar que las velocidades de flujo exceden el límite permisible y se puede contemplar arrastre no solo de finos, si no además de bloques o gravas de mayor tamaño. Se aprecia una disminución de velocidades al aumentar el periodo de retorno se puede ligar este efecto a la rugosidad asignada y la topografía del modelo.

Para los suelos franco arcilloso arenoso desnudo se aprecia que de igual forma se sobrepasan los valores permisibles, sin embargo a diferencia del uso de suelo anterior la duración del evento donde se presentan los flujos más críticos es menor. Al igual que en el uso de suelo anterior las velocidades disminuyen al aumentar el periodo de retorno, por ello se asume también que las condiciones antes mencionadas influyen en este uso de suelo.

Los efectos de cobertura vegetal muestran una excedencia de los flujos sobre todo a nivel puntual, las velocidades a nivel general llegan al límite para pastos cercanos a los 50 centímetros, por otra parte las velocidades no superan el valor límite en pastos de un metro. Podríamos afirmar que al aumentar la altura de los pastos se disminuye la velocidad de escorrentía y así mismo la erosión, sin embargo no significa que se elimina del todo el arrastre de finos.

En este caso particular se observó que al aumentar el periodo de retorno aumenta la velocidad de escorrentía, se puede entender que, el aumento del flujo del agua en presencia de cobertura vegetal es directamente proporcional al aumento del periodo de retorno del evento, a diferencia de los dos casos anteriores.

El modelo de efecto por cambio climático cuenta con la mayor precipitación y la mayor cantidad de caudal, pese a esto se espera que la cobertura vegetal incremente para este efecto. Siendo así, las velocidades presentadas tanto generales como puntuales pueden superar las velocidades de arrastre en pastos con alturas de 50 centímetros, pero no así pastos de mayor altitud. Finalmente los flujos de escorrentía para efecto de cambio climático disminuyen con el aumento de la cobertura vegetal tanto en altura como en densidad.

Comparando los resultados de los escenarios podemos notar que el talud en su etapa inicial (escenario 1) contaba con altas velocidades de arrastre, esto explica la razón de aplicar una obra para atacar el problema de erosión. Al realizar la excavación para aplicar la malla de acero MINAX, modificó la rugosidad del talud y parte de la topografía a nivel superficial, por lo que el escenario se modifica (escenario 2).

Las velocidades en ambos periodos de retorno del primer escenario con respecto al segundo disminuyen, de igual forma que la duración del evento crítico donde los flujos sobrepasan el límite, por lo que las medidas aplicadas reducen en cierta medida los flujos de escorrentía. A pesar de aplicar el control de erosión las magnitudes siguen superando el límite, pero este sistema no solo busca controlar la erosión del talud, sino además contener los posibles bloques producto del desgaste de los suelos que los sujetan.

Contrastando los efectos del control de escorrentía aplicado en el talud (escenario 2) y un escenario donde se aplica un control de erosión por medio de vegetación nativa (escenario 3), se aprecia que para los dos periodos de retorno disminuyen los flujos de escorrentía superficial de manera significativa.

El cambio de rugosidad debido a la cobertura vegetal colabora en gran medida a la reducción de velocidades, pero no evita que aún aplicando una medida natural como control erosivo no exista la posibilidad de arrastre de finos en el sitio. Por otra parte dentro del modelo de cobertura vegetal, no se está contemplando el aumento de infiltración gracias a las raíces de las plantas y tampoco los efectos de evapotranspiración los cuales disminuyen el total de agua llovida que escurre por el sitio.

Conclusiones

En la primera comparativa entre la condición inicial del talud y las obras aplicadas se observó una reducción de las velocidades, sin embargo no fue suficiente para evitar flujos erosivos. Se puede afirmar que la intervención del talud con la malla MINAX colabora en minimizar velocidades de arrastre, pero contribuye esencialmente en la retención de posible caída de bloques.

La comparativa entre la malla colocada y la cobertura vegetal propuesta, muestra la capacidad del control erosivo por medio de elementos naturales, ya que las escorrentías disminuyen significativamente entre el escenario de malla MINAX y el propuesto. Aunque el modelo de control erosivo siempre muestra picos de velocidad que pueden producir erosión, dicho modelo no contempla el aumento de infiltración y efectos de evapotranspiración que reducirían aún más las escorrentías.

El modelo propuesto debe llevar consigo al momento de sembrar la aplicación de geomallas o similares que podrían tomar parte de las velocidades y no afectar directamente el suelo, por lo que es posible que el modelo tenga un mejor desempeño. No obstante al ser el talud un conglomerado la malla MINAX juega un papel importante en retención y aun así permite revegetar el talud de manera natural aunque este signifique continuar erosionando durante el proceso.

El modelo propuesto termina ejerciendo una función de complemento para el caso estudiado, ya que al existir probabilidad de caída de bloques la malla MINAX adquiere relevancia.

Concluyendo el modelo de cambio climático para la propuesta de control, se visualiza la eficiencia del sistema de escorrentía inclusive para un evento de grandes proporciones, pues las velocidades observadas ni siquiera alcanzan las velocidades mínimas para arrastre de sedimentos.

Recomendaciones

Es recomendable para este caso particular el empleo de vegetación nativa como un control de la erosión superficial, ya que un aumento de la cobertura vegetal y del tipo implementado contribuyen al aumento de rugosidad y este en la disminución de las velocidades de flujo. En tanto el riesgo de caída de bloques no sea parte de las condiciones del talud.

De no ser posible implementar por temas de costos, el empleo de vegetación nativa del sitio, es recomendable el uso de geomallas o geomembranas para disminuir los efectos de las velocidades directamente sobre el suelo, es necesario aclarar que esto no significa eliminar arrastre de finos, sino reducción de dichos efectos.

Para estudios geotécnicos en taludes es necesario la incorporación de modelos hidrodinámicos, para modelar el comportamiento de los flujos de agua sobre estos, ya que la mayoría de los problemas provienen del efecto de la escorrentía. Inclusive si los problemas que presentan los taludes son de inestabilidad, los modelos hidrodinámicos funcionan como un complemento de dichos estudios y así poder verificar la toma de decisiones para futuras obras de control.

Con el fin de ampliar el análisis y obtener una mayor exactitud en cuanto al porcentaje de infiltración se recomienda realizar un estudio de la capa inmediatamente inferior al punto analizado, ya que encontrar suelos con contenido orgánico a mayor profundidad puede aumentar las capacidades de porosidad de los suelos. Además puede dar a conocer otros aspectos de saturación y capacidad hidráulica intersticial, podrían reafirmar o aclarar la capacidad de infiltración del suelo.

La investigación queda abierta a un análisis de evapotranspiración y de infiltración de la cobertura vegetal investigada y a modificar el modelo de escorrentía para así obtener un modelo de control erosivo más exacto.

Referencias

- [1] J.C. Lozano, “*Desarrollo de un modelo bidimensional hidrodinámico y de calidad en cuerpos de agua poco profundos*”, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes Colombia, 2003. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10014/u240078.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] I. Sánchez, “*Estrategias de manejo en el cultivo de avena (Avena Sativa) forrajera, como uso diferente del suelo en la zona norte de Cartago*”, Práctica Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2014. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2511/1/36943.pdf>
- [3] J. Suárez, “*Deslizamientos Tomo II: Técnicas de Remediación. La Vegetación y los Deslizamientos*”, Tomo II, pp. 291-312, 2012. <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>
- [4] L.R. Holdridge, “*Life Zone Ecology. Tropical Science Center. (Jiménez, H. Trad: <<Ecología basada en zonas de vida>>*”, 1ª ed, San José, Costa Rica, 1982. <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>
- [5] A. Silva, “*Guía práctica para la estabilización de taludes en los suelos de Costa Rica utilizando vegetación nativa*”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2013. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/4118>
- [6] E. Varela, “*Rediseño del sistema de evacuación de aguas y maximización de la cosecha de aguas, en la empresa Plantas y Flores Ornamentales C.A.B.H S.A, Llano Grande, Cartago*”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5809/sistema_evacuacion_plantas_ornamentales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [7] F. Torres, J. Padilla, C. Rodríguez, H. Ramírez, R. Cantero, “*La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia*”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 32(3), pp. 163-172, 2016. Recuperado de: https://www.scipedia.com/public/Torres-Bejarano_et_al._2015a
- [8] Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC), “*Iluminando el Patrimonio. Manejo de Cuencas Hidrográficas*”, (2016, Sept 29). <https://consulta.jasec.go.cr/index.php/responsabilidad-social/iluminando-el-patrimonio/181-responsabilidad-social/jasec-y-el-ambiente/121-manejo-de-cuencas-hidrograficas>
- [9] K. Villagra, “*Informe de Resultados de Suelo*”, FUNDATEC, Instituto Tecnológico, Escuela de Ingeniería Agrícola de Costa Rica, 16 Agt, 2021, Sin publicar.
- [10] V. T. Chow, D. R. Maidment, L. W. Mays, “*Hidrología Aplicada (Saldarriaga, J. G. ed y trad)*”, McGraw-Hill, Colombia, 1994. Recuperado de : <https://baixardoc.com/documents/hidrologia-aplicada-ven-te-chow-5cae52662105a>
- [11] M. Villón, “*Hidrología*” (1.ª ed.) Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, 2004.
- [12] J. Suárez, “*Control de Erosión en Zonas Tropicales*” Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2001. Recuperado de: <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>
- [13] V. T. Chow, “*Open-Channel Hydraulics.*” McGraw-Hill, New York, 1959. Recuperado de: <http://web.ipb.ac.id/~erizal/hidrolika/Chow%20-%20OPEN%20CHANNEL%20HYDRAULICS.pdf>



Remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de plantas de tratamiento de aguas residuales del Gran Área Metropolitana, Costa Rica

Remotion of physicochemical and microbiological parameters on wastewater treatment plants in Costa Rica's Great Metropolitan Area

Luz María Chacón-Jiménez¹, Eric Morales-Mora²,
Ernesto Alfaro-Arrieta³, Carmen Valiente-Alvarez⁴,
Liliana Reyes-Lizano⁵, Kenia Barrantes-Jiménez⁶

Fecha de recepción: 23 de septiembre, 2022

Fecha de aprobación: 28 de enero, 2023

Chacón-Jiménez, L.M; Morales-Mora, E; Alfaro-Arrieta, E; Valiente-Alvarez, C; Reyes-Lizano, L; Barrantes-Jiménez, K
Remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de plantas de tratamiento de aguas residuales del gran área metropolitana, costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 94-106.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6398>

- 1 Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: luz.chacon@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2506-0619>
- 2 Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: eric.morales@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8090-4947>
- 3 Laboratorio Nacional de Agua, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: ealfaro@aya.go.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1317-446X>
- 4 Laboratorio Nacional de Agua, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: civaliente@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-3578-8806>
- 5 Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: lilliana.reyes@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6722-184X>
- 6 Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: kenia.barrantes@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2673-9220>

Palabras clave

Agua residual; virus; saneamiento; vigilancia ambiental; higiene ambiental.

Resumen

Las aguas residuales inadecuadamente tratadas son un factor de riesgo para la salud pública dado que son un vehículo de diseminación de microorganismos patógenos como virus entéricos. Sin embargo, la circulación de patógenos virales en esta matriz ha sido poco estudiada en la región. El objetivo de este trabajo fue describir la presencia de cinco virus enteropatógenos y parámetros operativos básicos, en afluentes y efluentes de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con sistemas de lodos activados, ubicadas en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica durante el 2013. Los patógenos virales estudiados fueron: enterovirus, virus de hepatitis A, rotavirus A, norovirus G1 y norovirus G2 (determinados por PCR punto final); mientras que los parámetros de control de rendimiento analizados incluyeron disponibilidad bioquímica de oxígeno, disponibilidad química de oxígeno, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno y coliformes fecales. A nivel fisicoquímico todas las plantas mostraron un rendimiento aceptable, caso contrario a los parámetros microbiológicos, todos los virus investigados fueron detectados en aguas tratadas y no tratadas durante todo el año, siendo más frecuentes durante la época seca. El virus más frecuente fue rotavirus, seguido por norovirus G1. En conclusión, este estudio describe que durante el periodo estudiado las PTAR fueron eficientes en la remoción de parámetros fisicoquímicos, y que la circulación de virus entéricos es común en las PTAR estudiadas. Por ello, es necesaria la inclusión de procesos de desinfección adicionales para una descarga segura de las aguas tratadas.

Keywords

Wastewater; virus; sanitary engineering; environmental monitoring; environmental health

Abstract

Inefficient treated wastewaters are a critical factor for public health due to can be a dissemination vehicle for pathogens such as enteric viruses; nevertheless, the enteric viral circulation has been poorly studied in our region. This work aims to study the presence of five enteric virus, in parallel with operative parameters, in affluents and effluents of five wastewater treatment plants (WWTP) located in the Greater Metropolitan Area of Costa Rica in 2013. The viral pathogens studied were enterovirus, hepatitis A virus, rotavirus A, and norovirus GI and GII (determined by end point PCR technique); since basic control parameters analyzed were biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, suspended solids, settleable solids, fats and oils, blue methylene active substances, and fecal coliforms. All wastewater treatment plants showed acceptable removal of physicochemical parameters, but with microbial parameters, its efficiency was low; all enteric viruses were detected year-round at effluents and influents of the WWTP, with a predominance during the dry season. The most frequently detected virus was rotavirus, followed by norovirus G1. In conclusion, the studied wastewater treatment plants are efficient to remove physicochemical parameters; the year circulation of enteric virus in Costa Rica was demonstrated, and finally, a wastewater treatment plant improvement it is necessary to achieved treated waters safety discharges.

Introducción

El agua residual se define, de acuerdo con Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N°33601-MINAE-S, como aquella que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes de origen antropogénico; se reconocen dos tipos: agua residual tipo ordinario generado por actividades domésticas (uso de inodoros, duchas, lavatorios, lavado de ropa, etc.) y aguas de tipo especial que incluyen aguas de uso diferente al ordinario (industriales, pluviales e infiltraciones de origen desconocido) [1]. Distintos agentes químicos y biológicos causantes de enfermedad en poblaciones humanas son transmitidos por aguas residuales. Las sustancias tóxicas pueden ser de origen antropogénico, por ejemplo: hidrocarburos, plaguicidas o naturales como metales pesados [2]. Mientras que entre los microorganismos patógenos se encuentran bacterias como *Escherichia coli* diarrogénica [3], parásitos como *Cryptosporidium* sp. y *Ascaris* sp., y virus patógenos como rotavirus, norovirus y más recientemente SARS-CoV-2 [4]–[8].

Las aguas residuales no tratadas o tratadas de manera inadecuada, son un importante vehículo de diseminación de virus entéricos al ambiente por varias de las características inherentes de éstos patógenos, entre las más importantes destacan las altas concentraciones virales en la materia fecal (10^5 a 10^{11} por g de heces), sus bajas dosis infectantes (por ejemplo para rotavirus es 5,6 partículas virales), su resistencia parcial a las concentraciones de cloro normalmente utilizadas en las plantas de tratamiento, su estabilidad en un extenso rango de pH, y finalmente, las plantas de tratamiento por sí mismas, tienen una eficiencia parcial en la reducción de éstos patógenos [9]–[11].

En el año 2013 el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del Instituto costarricense de Acueductos y Alcantarillados realizó controles operacionales en 16 sistemas de tratamiento de aguas residuales, de los cuales cinco utilizan el sistema de lodos activados y se localizan en el Gran Área Metropolitana (GAM) [12], éstas fueron incluidas en el presente estudio. Para el año 2019 el LNA realizó vigilancia en 26 plantas de tratamiento de aguas residuales, siete con sistema de lodos activados y las restantes son lagunas facultativas o de oxidación [13]. El proceso de lodos activados consiste en un tanque con agitación continua, de un cultivo microbiano disperso en forma de flóculo, los virus se adhieren a estos flóculos, se sedimentan y da paso a un proceso de predación activa, vía microorganismos protistas capaces de metabolizar, de manera parcial, los contaminantes biológicos (virus, bacterias o levaduras) presentes en el agua [14]. Sin embargo, la eficiencia de las plantas puede disminuir por factores como diseño de la planta, tipo de comunidad microbiana residente, alta carga microbiana y ausencia de tratamientos terciarios, siendo posible la descarga de virus patógenos en los efluentes lo que representa un peligro para la salud pública [4].

Con base en lo anterior, el propósito de este estudio fue describir durante el año 2013, en afluentes y efluentes de PTAR ubicadas en la GAM y que utilizan lodos activados como sistema de depuración, la posible presencia de cinco virus entéricos (rotavirus, norovirus GI y norovirus GII, hepatitis A y enterovirus) junto con el análisis de los parámetros de control básicos establecidos por la legislación costarricense para el monitoreo de éstas: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno y coliformes fecales.

Materiales y métodos

Muestreo

Se analizaron 119 muestras de 1,5 L (n=60 entrada y n=59 salida) provenientes de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales ubicada en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Las plantas reciben aguas de tipo doméstico proveniente de entre 123 y 1033 personas y consisten en un tratamiento primario seguido de uno biológico de lodos activados, las aguas tratadas descargan en la cuenca del Río Virilla sin desinfección posterior al tratamiento (Figura 1).

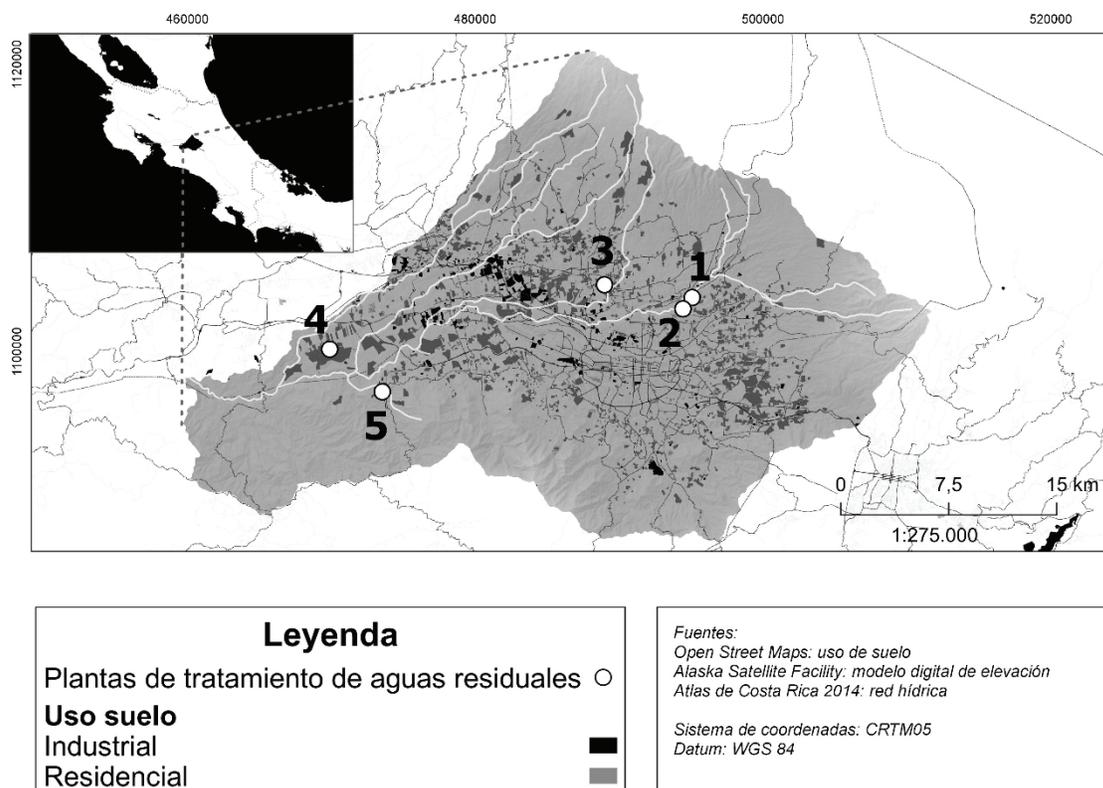


Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Virilla y ubicación geográfica de las PTAR incluidas en el estudio.

La toma de muestras se realizó a lo largo de un año, a fin de incluir muestras de época seca (marzo y diciembre) y época lluviosa (mayo y octubre) del 2013, en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizaban lodos activados, estaban administradas por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y se localizaban en el Gran Área Metropolitana. El muestreo fue de tipo simple instantáneo, entre 9:00 a.m. y 12:00 p.m. Para el análisis fisicoquímico se analizó una muestra por planta por periodo. Para el análisis microbiológico se tomaron muestras tres días consecutivos, por periodo. Todas las muestras se colectaron en recipientes ámbar estériles y se transportaron a 4 °C.

Análisis de parámetros fisicoquímicos

La toma de muestras fisicoquímicas y sus respectivos análisis se realizaron de acuerdo con lo establecido en los Métodos Estandarizados para la Examinación de Agua y Agua Residual (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [SMEWWW]) [15]. El muestreo



se realizó con botellas de plástico de alta densidad previamente lavadas; las muestras se mantuvieron en refrigeración durante el transporte y fueron analizadas en el Laboratorio Nacional de Aguas para los parámetros obligatorios del Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales N°33601-MINAE-S (1) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros Obligatorios según Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales N°33601-MINAE-S (1).

Análisis	Método de referencia [15]
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5220D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	5210B
Potencial de Hidrógeno	4500H
Temperatura	2550B
Sólidos Sedimentables	2540F
Coliformes Fecales	9221E
Grasas y Aceites	5520 B
Sólidos Suspendidos Totales	2540 B
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	5540 C

Análisis de coliformes fecales

Para el análisis de coliformes fecales se utilizó la técnica de fermentación de tubos múltiples (número más probable) de acuerdo con el método 9221E del SMEWW [15]. Para esto se inocularon diluciones seriadas hasta 1:1 000 000 para las entradas y 1:100 000 para las salidas en series de 5 tubos de caldo lauril sulfato (Oxoid®, Estados Unidos). Después de 48 ± 4 h de incubación a $35 \pm 0,5$ °C se analizó presencia de turbidez y gas en la muestra, todos los tubos que cumplieran estas características se inocularon en caldo EC-MUG (Oxoid®, Estados Unidos) y se incubaron por 24 ± 2 h a $44,5 \pm 0,5$ °C, todos aquellos tubos que presentaron turbidez y gas se consideraron positivos. La concentración final se estableció de acuerdo con la tabla de NMP escrita en SMEWWW [15]. Para estos ensayos se utilizaron los siguientes controles: *Escherichia coli* ATCC 25922 control positivo, *Salmonella* spp. ATCC 13076 control negativo y solución amortiguadora de dilución como control de reactivos.

Concentración de virus patógenos

Todas las muestras fueron prefiltradas con un tamiz metálico de 0,15 mm de poro con el fin de romper partículas orgánicas grandes. Posteriormente se siguió el protocolo 9510C del SMEWW [15] con modificaciones [16]. Brevemente, se realizó una filtración consecutiva de la muestra por filtros con diferente tamaño de poro, pretratados con extracto de carne al 3% (pH 7,2; Oxoid®, Reino Unido). La filtración inició con filtros de fibra de vidrio, 47 mm de diámetro y un poro de 80 μ m (13400-47-Q; Sartorius®, Alemania), después con filtros de nitrato de celulosa de 47 mm y 1,2 μ m de poro (11303-47-N; Sartorius®, Alemania); posteriormente con filtros de acetato de celulosa de 47 mm y 0,4 μ m de poro (11106-47-ACN; Sartorius®, Alemania). Finalmente, se ajustó el pH del filtrado a 3,5 y se filtró con un filtro de 0,2 μ m y diámetro de 47 mm de acetato de celulosa (1110tr-47N Sartorius®, Alemania), utilizando aproximadamente 3 filtros por cada muestra. Los filtros fueron eluidos utilizando 15 mL de extracto de carne pH 9,0 al 3%. Los eluidos fueron precipitados con PEG8000 y 17,5 g/L de NaCl después de una agitación a 4 °C durante toda la noche. El volumen final (0,5 mL) se almacenó a -70 °C hasta la purificación del ARN.

DetECCIÓN DE VIRUS PATÓGENOS

Se realizó una extracción del ARN utilizando el kit NucleoSpin RNA Virus (Macherey Nagel®, Alemania) de acuerdo las instrucciones del fabricante, posteriormente 8 µL de ARN se usaron en la síntesis de ADNc con el kit RevertAid™ H Minus Strand cDNA Synthesis con iniciadores de hexámeros aleatorios (Thermo Scientific®, Estados Unidos de Norte América).

Los análisis de presencia/ausencia de virus se realizaron por/con PCR punto final y PCR tiempo real, de acuerdo con lo publicado previamente [16]. Se analizaron 117 muestras por Enterovirus, 117 muestras por virus de la hepatitis A, 72 muestras por Norovirus GI, 72 muestras por Norovirus GII y 79 muestras por Rotavirus Grupo A. Para todos protocolos de amplificación molecular se utilizó el Master Mix 2X (Fermentas®, Estados Unidos) con un volumen final de reacción de 25 µL.

Los PCR de punto final (EV y HAV) se realizaron utilizando el termociclador Applied BioSystem® Veriti 9902 y los productos se visualizaron en un gel de electroforesis de agarosa al 2% teñido con GelRed®, los productos esperados fueron de 113 pb y 266 pb para EV y HAV, respectivamente. La cepa vacunal Sabin 1 (NIBSC 1/528) y la cepa HAX-70, se utilizaron como control positivo de EV y HAV, respectivamente, ambas suministradas por la Sección de Virología de la Facultad de Microbiología de la Universidad de Costa Rica. Los virus RV, NoVGI y NoVGII se determinaron por medio de RT-qPCR utilizando un termociclador StepOne Real-Time PCR (Applied Biosystems®) en el que una muestra se consideró positiva si su Cq fue menor de 35, como control positivo se utilizaron muestras de heces positivas donadas por el Hospital Nacional de Niños. Como control negativo se utilizó agua.

ANÁLISIS DE DATOS

El porcentaje de remoción para cada parámetro fisicoquímico y para coliformes fecales se estimó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de remoción} = 100 - \left(\frac{Cn \text{ parámetro a la salida} * 100}{Cn \text{ parámetro a la entrada}} \right)$$

El logaritmo de reducción de coliformes fecales se estimó mediante la siguiente fórmula:

$$\log \text{reducción} = \log_{10} Cn \text{ colifecales entrada} - \log_{10} Cn \text{ colifecales salida}$$

RESULTADOS

Indicadores básicos de rendimiento de la planta

Con respecto a las entradas de aguas residuales en las PTAR los parámetros coliformes fecales, temperatura y, grasas y aceites presentaron valores más altos en la estación seca, mientras que los siete parámetros restantes fueron más altos en estación lluviosa. A pesar de estas diferencias, en promedio, los parámetros fisicoquímicos de los afluentes se presentaron valores dentro de los límites permitidos, con excepción de las sustancias activas al azul de metileno en cuyo caso todos los afluentes se encontraron fuera del valor máximo permisible (Cuadro A1). Por último, la concentración de coliformes fecales en las entradas a las PTAR no está normada en la legislación costarricense; sin embargo, se observa que en estación lluviosa las concentraciones son un poco menores que en estación seca.

Con respecto a las aguas de salida de las PTAR, las cuales vierten directamente en cuerpos receptores, el pH y la temperatura muestran valores más altos en época lluviosa, mientras que el resto de los parámetros analizados presentan valores más altos en época seca. Con respecto

a los niveles de descarga, todos los parámetros fisicoquímicos, en promedio, tienen valores dentro de los parámetros establecidos, a diferencia de los coliformes fecales que presentaron valores superiores al máximo permisible ($3 \log_{10}$ NMP/100 mL) para la descarga durante todo el año (cuadro A2).

En relación con el porcentaje de remoción de cada indicador (Figura 2) se observó que los parámetros fisicoquímicos presentan altos porcentajes de remoción entre un 74,5% a un 91,8% independientemente de la estación climática, siendo las sustancias activas al azul de metileno el parámetro que presentó mejor remoción (más de un 90% en las dos épocas climáticas) y las grasas y aceites fue el parámetro fisicoquímico con menor remoción, con un promedio de 74,9%. Por el contrario, la remoción de coliformes fecales fue poco eficiente: 9,6% en estación seca y de 21,7% en época lluviosa.

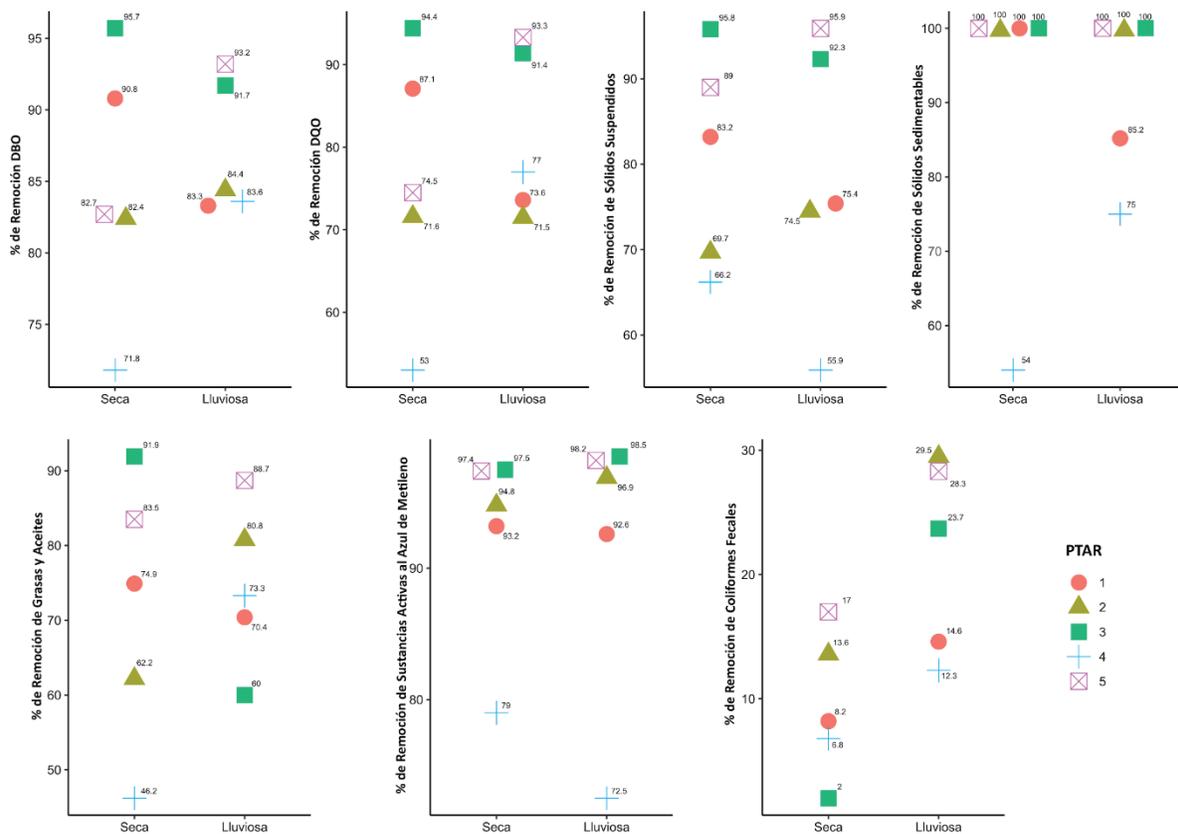


Figura 2. Porcentaje de remoción obtenido para cada uno de los parámetros de control obligatorio incluidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales N°33601-MINAE-S (1), por época climática.

Determinación de la circulación de virus patógenos en aguas residuales

En las entradas a las cinco PTAR, Rotavirus y Norovirus GI fueron los dos virus entéricos de más alta circulación en el año. De acuerdo con la época, Rotavirus fue el virus entérico más frecuente en época seca (13/24 muestras, 54,2%) mientras que en época lluviosa fue Norovirus GI (8/19 muestras, 38,9%). Por otro lado, hepatitis A fue el virus menos detectado a lo largo de este estudio (5/59 muestras, 8,5%). Es importante mencionar que el mayor número de positivos por virus entéricos patógenos se observó en época seca 30% contra un 24% en la época lluviosa (Cuadro 2).

Cuadro 2. Frecuencia de detección de virus entéricos humanos en las entradas de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales durante el 2013.

PTAR	Enterovirus		Virus de Hepatitis A		Rotavirus		Norovirus GI		Norovirus GII	
	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL
1	2/6	2/6	0/6	1/6	3/5	0/3	0/3	2/5	0/3	1/4
2	1/6	1/6	0/6	0/6	2/6	1/5	3/5	1/5	2/5	2/5
3	2/5	1/6	0/5	0/6	3/5	1/3	3/4	3/3	1/4	2/3
4	2/6	0/6	1/6	0/6	1/2	1/1	1/2	0/1	2/2	0/1
5	2/6	0/6	0/6	3/6	4/6	3/4	1/5	1/4	0/5	0/4
Total	9/29	4/30	1/29	4/30	13/24	6/16	8/19	7/18	5/19	5/14

ES: Época Seca. EL: Época Lluviosa.

En las salidas de las cinco PTAR, la presencia de virus entéricos fue muy homogénea con las siguientes excepciones: Norovirus GI es el de más alta positividad en época seca (7/14, 50%) y época lluviosa (6/20, 30%) y hepatitis A es el de menor positividad (época seca 2/28 7,1% y época lluviosa 1/30 3,3%). El resto de los virus tienen porcentajes de positividad que oscilan entre un 10% y un 30% aproximadamente (Cuadro 3). Con respecto a las entradas de las PTAR la detección de positivos fue de un 30% (36/120) en época seca y 24% (36/108) de la época lluviosa (Cuadro 3).

Cuadro 3. Frecuencia de detección de virus entéricos humanos en las salidas de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales durante el 2013.

PTAR	Enterovirus		Virus de Hepatitis A		Rotavirus		Norovirus G1		Norovirus G2	
	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL
1	2/5	1/6	1/5	1/6	1/4	2/3	1/2	0/4	1/2	0/3
2	0/6	0/6	0/6	0/6	3/4	3/6	0/1	3/4	0/2	1/4
3	2/5	2/6	1/5	0/6	1/3	0/4	4/4	1/4	1/4	0/4
4	1/6	2/6	0/6	0/6	0/3	2/3	0/2	2/3	0/2	1/3
5	3/6	0/6	0/6	0/6	3/5	1/6	2/5	0/5	0/5	0/5
Total	8/28	5/30	2/28	1/30	5/19	7/22	7/14	6/20	2/15	2/19

ES: Época Seca. EL: Época Lluviosa.

Discusión

En este estudio se observó que la calidad del agua a la entrada de las PTAR varía de acuerdo con la época climática del año y que a pesar de ser domiciliarias y ubicadas dentro de la Gran Área Metropolitana se reportan variaciones entre sí, por ejemplo, en la PTAR1 se encontró durante época seca valores de DBO y DQO más elevados que el resto de las PTAR, mientras que la PTAR2, ubicada en el mismo cantón, se observó valores más bajos. Con respecto a las salidas, todas las plantas en cualquier época del año presentaron valores por debajo de los máximos establecidos por la legislación costarricense [1], lo cual indica que, a pesar de las

variaciones en las cargas de las entradas, las PTARs son muy eficientes en la depuración de compuestos fisicoquímicos y que las aguas descargadas no afectan, en términos generales, el ecosistema acuático del cuerpo receptor.

Por el contrario, la carga microbiana de la entrada de las PTARs, estimada a través de la determinación de coliformes fecales, es muy estable a lo largo del año, teniendo como máximo concentraciones de $7,4 \log_{10}$ NMP/100 mL en época seca y $6,6 \log_{10}$ NMP/100 mL en época lluviosa, coincidiendo con el metaanálisis realizado por McMinn et al., que informa concentraciones de coliformes fecales en afluentes entre $6,5$ y $7,3 \log_{10}/100$ mL [17].

En el caso de la concentración de coliformes fecales en las salidas de las PTAR se observa que en ninguna de las muestras analizadas se cumplió con el parámetro establecido por la legislación nacional para la descarga de coliformes fecales ($3 \log_{10}/100$ mL) [1], siendo las concentraciones entre 2 y 3 log (100 a 1000 veces) superiores al límite establecido. Esto provoca que las descargas de aguas residuales contaminen los cuerpos receptores de estas, induciendo la disminución en la calidad del agua y afectando directamente al ecosistema. Por ejemplo se da un aumento neto de materia orgánica en los cuerpos de agua que puede afectar el oxígeno disuelto y la sobrevivencia de ciertos grupos microbianos y el aumento de amonio y cloruros, ambos potencialmente tóxicos. Por último, las descargas de aguas residuales pueden promover procesos de eutrofización, capaces de inducir floraciones de algas y crecimiento de plantas en el ecosistema acuático, lo cual, a su vez, genera cambios en la turbidez del agua, aumentos en la biomasa, incrementos en las tasas de sedimentación y la consecuente disminución en la diversidad de especies residentes en el cuerpo de agua [18], [19].

Adicionalmente, la reducción de estos indicadores durante el proceso de tratamiento debe ser al menos de $3,0 \pm 2,1 \log_{10}$ [17]. Mientras que en este estudio la remoción fue $1,1 \pm 0,6 \log_{10}$, muy por debajo de lo documentado. Los lodos activados en condiciones óptimas logran reducir la carga de microorganismos en 3 logs, por lo cual, la Organización Mundial de la Salud recomienda agregar procesos adicionales de desinfección, como cloración o luz ultravioleta, antes de la descarga a los cuerpos receptores [4], [20]. De acuerdo al último informe de "Evaluación de Eficiencias de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales 2021", los valores de remoción para parámetros fisicoquímicos son superiores al 80% en las plantas incluidas en el estudio, mientras que la remoción en coliformes fecales es nula [21]; lo cual indica que a situación observada en el año 2013 sigue siendo vigente en la actualidad.

Es importante destacar la presencia de virus entéricos en los afluentes de las PTAR durante todo el año, lo cual indica que éstos circulan de forma regular en la población servida. Este comportamiento de virus entéricos es común en países tropicales, donde se ha informado de la circulación anual de rotavirus, norovirus GI y GII, virus de hepatitis A y enterovirus [22]–[26]. Otro aspecto relevante es la mayor circulación de virus en época seca, lo cual coincide con el periodo de mayor número de casos de diarrea en el país [27]–[29], sin embargo es importante considerar que se ha descrito que las detecciones virales dependen en gran medida del volumen de material que ingresa a las PTAR, por lo que la estación lluviosa podría aumentar el caudal y generar una dilución de los microorganismos presentes, por el contrario, en la estación seca, los caudales son menores y facilitan la concentración de patógenos [30].

Por otro lado, en este estudio se detectaron virus entéricos en alrededor del 20% de las muestras analizadas después del tratamiento, independientemente de la época del año. Esta situación es preocupante dado que los virus son muy persistentes en el ambiente, por ejemplo, para disminuir $1 \log_{10}$ de un enterovirus como polio, en un afluente secundario, como las aguas descargadas por las PTAR en estudio, se requieren al menos 20 días a 15°C y para remover adenovirus, se requiere 45 días a 15°C [31], [32]. Esto indica que la descarga de estos virus

al ambiente podría implicar un grave peligro para la salud pública, máxime si estas aguas son utilizadas para el riego de vegetales crudos, lo cual ha sido demostrado previamente en la región latinoamericana [16], [33].

Conclusiones

Este estudio demostró una diferencia en la eficiencia de las PTAR para remoción de parámetros fisicoquímicos y microorganismos, siendo muy eficientes para los primeros y poco eficientes para los segundos, situación que por la naturaleza misma de la infraestructura de las PTAR sigue ocurriendo a la fecha. Además, se evidenció la persistencia durante todo un año, de virus entéricos en las aguas residuales tratadas, lo que también demuestra la circulación endémica de estos patógenos en la Gran Área Metropolitana costarricense. En vista de esta situación y del riesgo para la salud pública que implica la descarga de microorganismos potencialmente patógenos en el ambiente, se recomienda implementar estrategias de desinfección adicionales, como cloración o exposición a luz ultravioleta, en los efluentes de las plantas, que permitan minimizar la carga microbiana antes de su descarga a los cuerpos receptores. Es importante mencionar que en los últimos años, las autoridades responsables han iniciado a tomar medidas de contención y se ha fomentado el desarrollo de proyectos de saneamiento en los que se incorporen tratamientos terciarios.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), *Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales*. Costa Rica, 2007, p. 56. [Online]. Available: http://www.digecca.go.cr/sites/default/files/reglamento_vertido_reuso_aguas_residuales_0.pdf
- [2] L. Chacón, L. Reyes, L. Rivera-Montero, and K. Barrantes, "Transport, fate, and bioavailability of emerging pollutants in soil, sediment, and wastewater treatment plants: potential environmental impacts," in *Emerging Contaminants in the Environment*, vol. 15, no. 2, Elsevier, 2022, pp. 111–136. doi: 10.1016/B978-0-323-85160-2.00020-2.
- [3] L. M. Chacón Jiménez, K. Hall Loría, P. C. Rivera Navarro, L. Reyes Lizano, R. Achí Araya, and K. Barrantes Jiménez, "Circulación de genes de virulencia asociados a *Escherichia coli* diarrogénica en aguas residuales del Gran Área Metropolitana de Costa Rica," *Población y Salud en Mesoamérica*, vol. 19, no. 19, Nov. 2021, doi: 10.15517/psm.v19i2.48037.
- [4] World Health Organization, "WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in Agriculture," *WHO Library Cataloguing-in-Publication Data*, vol. IV. World Health Organization, Geneva, p. 204, 2006. [Online]. Available: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gsuweg4/en/
- [5] Contraloría General de la República, "Informe acerca de la eficacia del Estado para garantizar la calidad del agua en sus diferentes usos," Costa Rica, 2013. [Online]. Available: https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/jaguar/sad_docs/2013/DFOE-AE-IF-01-2013.pdf
- [6] W. Randazzo, P. Truchado, E. Cuevas-Ferrando, P. Simón, A. Allende, and G. Sánchez, "SARS-CoV-2 RNA in wastewater anticipated COVID-19 occurrence in a low prevalence area," *Water Res.*, vol. 181, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.115942.
- [7] B. Prevost, F. S. Lucas, A. Goncalves, F. Richard, L. Moulin, and S. Wurtzer, "Large scale survey of enteric viruses in river and waste water underlines the health status of the local population," *Environ. Int.*, vol. 79, pp. 42–50, 2015, doi: 10.1016/j.envint.2015.03.004.
- [8] M. Bisseux *et al.*, "Monitoring human enteric viruses in wastewater and relevance to infections encountered in the clinical setting: A one-year experiment in central France, 2014 to 2015," *Eurosurveillance*, vol. 23, no. 7, pp. 1–11, 2018, doi: 10.2807/1560-7917.ES.2018.23.7.17-00237.
- [9] U.S. Environmental Protection Agency, "Guidelines for Water Reuse," *U.S. Environmental Protection Agency National Risk Management Research Laboratory U.S. Agency for International Development*, no. September. Washington, DC, United States of America, p. 643, 2012. [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR-1530.pdf>



- [10] T.-T. Fong and E. K. Lipp, "Enteric Viruses of Humans and Animals in Aquatic Environments: Health Risks, Detection, and Potential Water Quality Assessment Tools," *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, vol. 69, no. 2, pp. 357–371, Jun. 2005, doi: 10.1128/MMBR.69.2.357-371.2005.
- [11] C. N. Haas, J. B. Rose, C. Gerba, and S. Regli, "Risk Assessment of Virus in Drinking Water," *Risk Anal.*, vol. 13, no. 5, pp. 545–552, Oct. 1993, doi: 10.1111/j.1539-6924.1993.tb00013.x.
- [12] F. Ruiz Fallas, "'Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica' Situación Actual y Perspectiva," San José, 2012. [Online]. Available: [https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica Situación Actual y Perspectiva.pdf](https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Gestión%20de%20las%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales%20en%20Costa%20Rica%20Situación%20Actual%20y%20Perspectiva.pdf)
- [13] L. Zúñiga Zúñiga, E. Alfaro Arrieta, and I. Vega Guzmán, "Informe anual Aguas Residuales: Resultados sobre calidad de aguas residuales en los sistemas de tratamiento operados y administrados por el AyA, aguas superficiales y estudios especiales," *La Unión*, 2019. [Online]. Available: <http://dspace-aya.eastus.cloudapp.azure.com:8080/xmlui/handle/aya/375>
- [14] C. Naughton and O. Rousselot, "Activated Sludge," in *Global Water Pathogen Project*, 1st ed., J. Mihelcic and M. Verbyla, Eds. Michigan: Michigan State University, 2017. doi: 10.14321/waterpathogens.62.
- [15] (American Public Health Association) APHA, (American Water Works Association) AWWA, and (Water Environment Federation) WEF, *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [16] L. Chacón *et al.*, "A Somatic Coliphage Threshold Approach To Improve the Management of Activated Sludge Wastewater Treatment Plant Effluents in Resource-Limited Regions," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 86, no. 17, pp. e00616-20, Jun. 2020, doi: 10.1128/AEM.00616-20.
- [17] B. R. McMinn, N. J. Ashbolt, and A. Korajkic, "Bacteriophages as indicators of fecal pollution and enteric virus removal," *Lett. Appl. Microbiol.*, vol. 65, no. 1, pp. 11–26, 2017, doi: 10.1111/lam.12736.
- [18] R. Sivaraja and K. Nagarajan, "Levels of Indicator Microorganisms (Total and Fecal Coliforms) in Surface waters of rivers Cauvery and Bhavani for Circuitously predicting the Pollution load and Pathogenic risks," *Int. J. PharmTech Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 455–461, 2014, [Online]. Available: [http://sphinxesai.com/2014/PTVOL6/PT=07\(455-461\)AJ14.pdf](http://sphinxesai.com/2014/PTVOL6/PT=07(455-461)AJ14.pdf)
- [19] J. N. Edokpayi, J. O. Odiyo, and O. S. Durowoju, "Impact of Wastewater on Surface Water Quality in Developing Countries: A Case Study of South Africa," in *Water Quality*, vol. 11, no. tourism, InTech, 2017, p. 13. doi: 10.5772/66561.
- [20] T. Ito *et al.*, "Evaluation of virus reduction efficiency in wastewater treatment unit processes as a credit value in the multiplebarrier system for wastewater reclamation and reuse," *J. Water Health*, vol. 14, no. 6, pp. 879–889, 2016, doi: 10.2166/wh.2016.096.
- [21] I. Vega Guzman, E. Arfaro Arrieta, and C. Mora Aparicio, "Evaluación de la Eficiencia de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales 2021," Pavas, 2022.
- [22] T. da Silva Poló *et al.*, "Human norovirus infection in Latin America," *J. Clin. Virol.*, vol. 78, pp. 111–119, May 2016, doi: 10.1016/j.jcv.2016.03.016.
- [23] E. M. Kane, R. M. Turcios, M. L. Arvay, S. Garcia, J. S. Bresee, and R. I. Glass, "The epidemiology of rotavirus diarrhea in Latin America: anticipating rotavirus vaccines," *Rev. Panam. Salud Pública*, vol. 16, no. 6, pp. 371–377, 2004, doi: 10.1590/s1020-49892004001200002.
- [24] P. Arauz-Ruiz *et al.*, "Presumed Common Source Outbreaks of Hepatitis A in an Endemic Area Confirmed by Limited Sequencing Within the VP1 Region," *J. Med. Virol.*, vol. 65, pp. 449–456, 2001.
- [25] L. E. Zambrana *et al.*, "Etiology of Childhood Diarrhea After Rotavirus Vaccine Introduction," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. 33, no. 11, pp. 1156–1163, 2014, doi: 10.1097/inf.0000000000000427.
- [26] L. Bourdett-Stanziola, E. Ortega-Barria, F. Espinoza, F. Bucardo, C. Jimenez, and A. Ferrera, "Rotavirus Genotypes in Costa Rica, Nicaragua, Honduras and the Dominican Republic," *Intervirology*, vol. 54, no. 1, pp. 49–52, 2011, doi: 10.1159/000318863.
- [27] A. Espinoza, "Comportamiento de la enfermedad diarreica en Costa Rica, de 1995 al 2001," *Rev. Costarric. Salud Pública*, vol. 13, no. 24, 2004.
- [28] L. Chacón Jiménez *et al.*, "Relación entre la presencia de colifagos en agua para consumo humano, las lluvias y las diarreas agudas en Costa Rica," *Rev. Costarric. Salud Pública*, vol. 24, no. 2, pp. 161–168, 2015, [Online]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1409-14292015000200160&lng=en&nrm=iso



- [29] L. Chacon, E. Morales, C. Valiente, L. Reyes, and K. Barrantes, "Wastewater-Based Epidemiology of Enteric Viruses and Surveillance of Acute Gastrointestinal Illness Outbreaks in a Resource-Limited Region," *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, no. 1, 2021, doi: 10.4269/ajtmh.21-0050.
- [30] N. Sims and B. Kasprzyk-Hordern, "Future perspectives of wastewater-based epidemiology: Monitoring infectious disease spread and resistance to the community level," *Environ. Int.*, vol. 139, no. March, p. 105689, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105689.
- [31] M. Rusiñol and R. Girones, "Summary of Excreted and Waterborne Viruses," in *Global Water Pathogen Project*, J. S. Meschke and R. Girones, Eds. Michigan State University, 2019, pp. 3–10. doi: 10.14321/waterpathogens.19.
- [32] T. Aw, "Environmental Aspects and Features of Critical Pathogen Groups," in *Global Water Pathogen Project*, J. Rose and B. Jiménez-Cisneros, Eds. Michigan State University, 2019, pp. 1–22. doi: 10.14321/waterpathogens.2.
- [33] E. M. Symonds, M. E. Verbyla, J. O. Lukasik, R. C. Kafle, M. Breitbart, and J. R. Mihelcic, "A case study of enteric virus removal and insights into the associated risk of water reuse for two wastewater treatment pond systems in Bolivia," *Water Res.*, vol. 65, pp. 257–270, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.watres.2014.07.032.

Anexos

Cuadro A1. Valores y promedio de parámetros obligatorios y coliformes fecales en las entradas de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales durante el 2013 según el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales N°33601-MINAE-S.

PTAR	DBO mg/L		DQO mg/L		Sólidos Suspendidos mg/L		Sólidos Sedimentables mL/L		Grasas Y Aceites mg/L		pH		Temperatura °C		Sustancias Activas al Azul de Metileno		C. fecales (log ₁₀ NMP/100 mL)	
	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL
1	321,5	290,5	609,5	537,0	249,5	128,0	2,3	1,4	23,5	13,9	7,5	7,8	22,4	22,8	19,5	13,9	7,4	7,1
2	187,0	207,5	387,5	323,0	114,0	131,5	0,7	1,3	13,5	13,0	7,0	7,8	21,4	23,5	6,7	10,7	7,2	6,6
3	241,5	374,5	399,0	883,5	131,0	343,5	1,3	2,3	26,0	18,0	8,1	8,4	24,0	25,3	13,5	20,5	7,4	6,9
4	216,5	211,0	392,	313,5	251,5	122,5	2,5	2,0	17,0	15,0	7,6	7,5	26,2	27,5	21,0	16,0	7,3	6,9
5	202,5	329,0	402,0	687,0	109,0	241,0	2,1	1,5	20,0	23,0	7,6	8,3	26,4	25,9	16,5	18,5	7,3	6,8
Promedio	233,8	282,5	438,1	548,8	171,0	193,3	1,8	1,7	20,0	16,6	7,6	8,0	24,1	25,0	15,4	15,9	7,3	6,9

ES: Época Seca. EL: Época lluviosa. Valores máximos permitidos de descarga: DBO 300 mg/L, DQO_{5,20} 750 mg/L, sólidos suspendidos 300 mg/L, sólidos sedimentables 5 mL/L, grasas y aceites 50 mg/L, pH 6-9, temperatura 15 – 40 °C, sustancias activas al azul de metileno 5 mg/L, coliformes fecales no está normado [1].

Cuadro A2. Valores y promedio de parámetros obligatorios y coliformes fecales en las salidas de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales durante el 2013 según el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales N°33601-MINAE-S.

PTAR	DBO mg/L		DQO mg/L		Sólidos Suspendidos mg/L		Sólidos Sedimentables mL/L		Grasas Y Aceites mg/L		pH		Temperatura °C		Sustancias Activas al Azul de Metileno		C. fecales (log ₁₀ NMP/100 mL)	
	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL	ES	EL
1	29,5	48,5	78,5	141,5	42,0	31,5	0,0	0,2	5,9	4,1	6,1	7,3	22,6	22,8	1,3	1,0	6,8	6,1
2	33,0	33,0	110,0	92,0	34,5	33,5	0,0	0,0	5,1	2,5	7,0	6,7	21,7	24,1	0,3	0,3	6,2	4,7
3	10,5	31,0	22,5	76,0	5,5	26,5	0,0	0,0	2,1	7,2	3,5	7,1	12,2	24,3	0,3	0,3	7,2	5,3
4	61,0	34,5	184,5	72,0	85,0	54,0	1,2	0,5	9,2	4,0	7,5	7,4	25,9	27,4	4,4	4,4	6,8	6,1
5	35,0	22,5	102,5	46,0	12,0	10,0	0,0	0,0	3,3	2,6	7,1	7,5	26,7	26,1	0,4	0,3	6,1	4,9
Promedio	33,8	33,9	99,6	85,5	35,8	31,1	0,2	0,1	5,1	4,1	6,2	7,2	21,8	24,9	1,4	1,3	6,6	5,4

ES: Época Seca. EL: Época lluviosa. Valores máximos permitidos de descarga: DBO 50 mg/L, DQO_{5,20} 150 mg/L, sólidos suspendidos 50 mg/L, sólidos sedimentables 1 mL/L, grasas y aceites 30 mg/L, pH 5-9, temperatura 15 – 40 °C, sustancias activas al azul de metileno 5 mg/L, coliformes fecales 3 log₁₀ NMP/100 mL [1].

Gestión cromática en la evaluación de lesiones melanocíticas

Chromatic management in the evaluation of melanocytic lesions

Mac-Arturo Murillo-Fernández¹, Luis-Alexander Calvo-Valverde²,
Ernesto Montero-Zeledón³, José-Esteban Pérez-Hidalgo⁴,
Dionisio-Alberto Gutiérrez-Fallas⁵, Daniel Gutiérrez-Araya⁶

Fecha de recepción: 4 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 13 de febrero, 2023

Murillo-Fernández, M.A; Calvo-Valverde, L.A; Montero-Zeledón, E; Pérez-Hidalgo, J.E; Gutiérrez-Fallas, D.A; Gutiérrez-Araya, D. Gestión cromática en la evaluación de lesiones melanocíticas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 107-123.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6415>

- 1 Escuela de física Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: mamurillo@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6913-3472>
- 2 Escuela de Computación Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: lcalvo@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3802-9944>
- 3 Escuela de física Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: emontero@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>
- 4 Escuela de física Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: jose.perez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7184-9974>
- 5 Escuela de física Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: dgutierrez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7190-8858>
- 6 Hospital San Juan de Dios, Servicio de Anatomía Patológica. Correo electrónico: danielgutierrez@gmail.com

Palabras clave

Melanoma; gestión del color; CIELAB; lesiones melanocíticas.

Resumen

Uno de los criterios más extendidos en la valoración de imágenes de lesiones melanocíticas pigmentadas es el método ABCDE, en el cual el color (C) es uno de los componentes más relevantes. Sin embargo, la mayor parte de su valoración es subjetiva, raramente toma en cuenta los múltiples factores que pueden afectar la captura, procesamiento u observación de las imágenes, así como las limitaciones y diferencias perceptivas humanas. Esta particularidad puede afectar la detección temprana, el diagnóstico y tratamiento de este tipo de lesiones cutáneas. Con el desarrollo de la Tele-dermatología diagnóstica y los cada vez más sofisticados algoritmos de IA, se hace necesario contar con procedimientos objetivos que optimicen y fidelicen el procesamiento de imágenes y que apoyen a los profesionales de salud con el propósito de incidir positivamente en los índices crecientes de melanomas. El propósito de este artículo es proporcionar una metodología de valoración cromática, sustentada en el sistema CIEL*a*b* y en mejores prácticas de gestión cromática de imágenes, proporcionando a un grupo de profesionales en la salud, que no necesariamente está familiarizado a utilizar el color como herramienta objetiva de diagnóstico.

Keywords

Melanoma; color-management; CIELAB; melanocytic-lesions.

Abstract

One of the most widespread criteria in the assessment of images of pigmented melanocytic lesions is the ABCDE method, in which color (C) is one of the relevant issues. However, most of its assessment is subjective, rarely considering the multiple factors that may affect image capture, processing, or observation, as well as human limitations and perceptual differences. This particularity can affect the early detection, diagnosis, and treatment of this type of skin lesions. With the development of diagnostic tele-dermatology and increasingly sophisticated AI algorithms, there is a need for objective procedures that optimize image processing so, it supports health professionals and effectively impact the increasing rates of melanomas. The purpose of this study is to provide a chromatic assessment methodology based on the CIEL*a*b* system and, better practices in image chromatic management, simplifying the procedures to a group of healthcare professionals who are not necessarily familiar with using color as an objective diagnostic tool.

Introducción

El cáncer de piel es un tipo frecuente de cáncer de origen multifactorial. Estadísticas recientes, muestran que en Costa Rica su incidencia ha sido de alrededor de un 23 % en la última década, dónde aproximadamente, uno de cada cuatro casos de cáncer diagnosticados corresponde a cáncer de piel [1]. Según el Registro Nacional de Tumores, del Ministerio de Salud en

Costa Rica⁷, por ejemplo, en el año 2014, de 4850 casos, 1399 correspondían a casos en piel, principalmente por la exposición prolongada a los rayos UV (del sol y las cámaras de bronceado) y por las mutaciones genéticas, entre otros factores de riesgo [2].

Las lesiones melanocíticas pigmentadas, comúnmente denominadas melanomas, son uno de los principales y más peligrosos cánceres de piel. Se originan en los melanocitos, las células dendríticas oriundas de la cresta neural⁸, que se encuentran en la capa de células basales en la parte más profunda de la epidermis, encargadas de producir la melanina (pigmento clave en la protección solar de la piel).

La detección temprana, un diagnóstico acertado y unas adecuadas estrategias de prevención de este tipo de lesiones, son los principales factores que permiten mantener la tasa de mortalidad en números relativamente bajos con respecto a otros tipos de cánceres [3]. A pesar de ello, la alta incidencia mundial de melanomas, la rapidez con que evolucionan y el descuido de los pacientes, han sido elementos de preocupación creciente entre los especialistas. Actualmente, se buscan métodos más eficientes de valoración, diagnóstico y tratamiento, incluso en estadios más tempranos, cuando la persona detecta por primera vez alteraciones sospechosas en su piel.

En años recientes, con el auge de la telemedicina [4], equipos de valoración y diagnóstico de lesiones melanocíticas, están incorporando dermatoscopios con aplicaciones (AP's) [5] de Inteligencia Artificial (IA) [6] que facilitan el diagnóstico temprano de este tipo de lesiones.

Las lesiones melanocíticas pigmentadas se pueden confundir con otro tipo de lesiones cutáneas, e incluso entre melanomas de distinto tipo [7], lo que puede llevar a diagnósticos errados, sub- o sobrestimar su malignidad y llevar a tratamientos inapropiados o tardíos.

La valoración objetiva de las lesiones cutáneas, en especial las lesiones melanocíticas pigmentadas han sido objeto de muchos estudios científicos por décadas, sin embargo, no es hasta el año 2000, en un encuentro de especialistas⁹ y un congreso del 2006 [8] que comenzaron a unificarse los múltiples criterios de evaluación y diagnóstico.

A partir de este congreso, el método ABCDE, fue catalogado como un método objetivo expedito de diagnóstico óptico-visual [9]. El método ABCDE alude a las características de A= Asimetría; B= Borde; C= Color; D= Diámetro y E= Evolución del melanoma. De todas ellas, quizás el color es de las peculiaridades objetivas en las cuales hay mayor nivel de sofisticación, y menor conocimiento entre los dermatólogos, pues la determinación de las características cromáticas de un melanoma implica cierto grado de conocimiento de los fundamentos teóricos y la aplicación práctica del color.

El análisis cromático de imágenes tomadas a través de dermatoscopios profesionales, cámaras fotográficas o teléfonos inteligentes, e incluso en imágenes disponibles en los grandes data sets y diccionarios de imágenes, carecen de datos relacionados a su captura y procesamiento, que limitan su valoración objetiva. Son múltiples los factores que pueden distorsionar los colores que se observan después de una captura o extracción de una base de datos, entre ellas el tipo de iluminante, la contaminación cromática circundante, la geometría de la captura de la imagen o

7 Ver Registro Nacional de Tumores, MS; <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/vigilancia-de-la-salud/estadisticas-y-bases-de-datos/estadisticas/estadistica-de-cancer-registro-nacional-tumores>

8 Células de la Cresta Neural (CCN), son células pluripotenciales efímeras que emergen en las primeras semanas del embrión, en el proceso del desarrollo neuronal (neurulación) y pueden migrar a casi todos los tejidos del embrión, tienen la particularidad que pueden derivar en otros tipos de células.

9 The consensus net meeting on dermoscopy (CNMD) in 2000.

las características y las condiciones del equipo de captura de la imagen, entre otros factores. entonces no es de extrañar que la valoración sigue siendo en gran medida subjetiva, sujeta a errores interpretativos.

El presente artículo se propone, exponer los fundamentos teóricos del color, y un método objetivo y eficaz de gestión del color en la valoración de lesiones melanocíticas.

Valoración cromática de lesiones cutáneas pigmentadas

El sistema neuro-senso-visual de captura y procesamiento de la información cromática del ser humano es un mecanismo altamente sofisticado, cuyo funcionamiento y grado de sensibilidad están influenciados por múltiples factores que raramente coinciden exactamente con otro ser humano [10]. De hecho, en la práctica, no hay dos personas que “perciban” los colores de la misma forma. Algunos factores internos que afectan la forma en que las personas perciben el color tienen que ver con la nutrición, el estado anímico psicológico o mental [11], la salud, la genética, la fatiga visual, la memoria cromática, la edad o los estados alterados por efectos traumáticos, por consumo de sustancias psicotrópicas e ingesta de ciertos medicamentos o alimentos; sin contar las características y estado de la red neuronal de cada individuo [12]. Otros factores externos, que afectan severamente la capacidad de las personas de percibir los colores, tienen que ver con el grado de intensidad, orientación y tipo de iluminación circundante, los efectos de fondo o contraste, el tipo de materiales, el tiempo, la forma de la observación y múltiples factores ambientales [13].

Adicionalmente, un dispositivo de captura de imágenes como un dermatoscopio o una cámara digital, tienen la particularidad que sus fuentes de luz (iluminantes) son de muy diversos tipos y calidad, la mayoría no reúnen requisitos de estandarización u homologación. Cuando se observan las data-sets de fotografías dermatológicas, en su gran mayoría omiten referencias a los equipos o la forma en que fueron capturadas las imágenes. Si finalmente se integran en el proceso a los monitores donde se evalúan las imágenes, raramente se encuentran monitores calibrados o se tiene el control de los efectos circundantes que también afectan su apreciación visual.

Toda esta gama de factores subjetivos de quien valora una lesión cutánea pigmentada hace que sea necesario establecer métodos objetivos de captura, procesamiento y valoración de imágenes, que permitan una comunicación de la información cromática adecuada. Esto es lo que se conoce comúnmente como un Sistema de Gestión del Color (SGC). Una de las principales fuentes de solución proviene de la estandarización del observador, y las convenciones establecidas por la Comisión Internacional sobre la Iluminación (CIE: *Comission Internationale de l'Eclairage*), que desde 1931 viene desarrollando todo un conjunto de normas, estándares y conceptos para lograrlo. También, es importante reconocer los esfuerzos de la industria, como por ejemplo en la de reproducción gráfica, que lleva muchos años lidiando con este tipo circunstancias.

La percepción visual cromática primaria ocurre en la retina, donde tres tipos de fotorreceptores son estimulados por la “luz” en distintos rangos del espectro [14], a partir de la cual se formula la teoría triestímulo del color, de donde surgieron los estándares RGB (R: *Red*; G: *Green*; B: *Blue*); de ahí que se formulara la convención del “Observador Estándar”, que reúne un conjunto de datos de observaciones que identifican a un observador promedio. A partir de los datos de los tres distintos fotorreceptores se estableció el espacio de color CIE-1931, con 2° de observación y más tarde, en 1964 con 10° de observación (esto es la amplitud del ángulo de observación). Con los datos recopilados de iluminantes estándar y otros datos radiométricos, se desarrolló la fórmula triestímulo (XYZ) del color, base para la construcción de los denominados espacios de color, un concepto fundamental para la comprensión espacial de las características del

color. En 1976 se introdujeron los espacios de color uniforme CIE-L*a*b*, y CIE-L*u*v*, los más aceptados para la valoración cromática actual, de tal manera que entre los distintos espacios de Color (sRGB; rgb; XYZ; xyz; L*a*b*; etc.) se pueden hallar conversiones matemáticas precisas para las igualaciones cromáticas respectivas [15].

El espacio CIE-L*a*b*, debido a su adaptación intuitiva con la percepción visual, ha sido el de mayor difusión, de ahí que la propuesta desarrollada en este artículo se fundamenta en este sistema. La coordenada de la Claridad (L* del inglés Luminosity) establece la dimensión del eje Blanco-negro (escala entre 0 y 100), donde todos los valores de gris se hallan ubicados. Mientras que las coordenadas a⁺-a⁻ establecen el eje Rojo-Verde, y las coordenadas b⁺-b⁻, el eje amarillo azul. Cada color específico (por ejemplo, en una lesión melanocítica pigmentada) podrá ser ubicado en el espacio de color CIE-L*a*b*. De estas coordenadas del espacio de Color CIE-L*a*b* se derivan los atributos cromáticos característicos a saber: Valor o Claridad (L*), Tono o Saturación [$h^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$] y el Matiz o Croma (pureza o intensidad del color) ($C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$). En la actualidad, la mayor parte de los estándares definidos por la CIE, han sido establecidos como normas por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO: *International Organization for Standardization*)¹⁰, y cada día es más frecuente su aplicación en la segmentación de lesiones melanocíticas [16].

Lo anterior implica que, al caracterizar el color de una lesión melanocítica pigmentada (o cualquier otra lesión cutánea), cada punto o pixel de la imagen puede ser claramente identificado por sus coordenadas cromáticas (RGB, XYZ o L*a*b*), y de ahí que se puedan (a) establecer áreas de color uniforme, donde los valores cromáticos se mantienen más o menos en un mismo rango; (b) determinar diferencias entre las distintas partes de la lesión; (c) distinguir “bordes” o “límites” entre las intersecciones de las distintas partes de la lesión, e inclusive con las partes de la piel sana; (d) identificar, mediante un seguimiento a las lesiones, cambios cromáticos en el tiempo [E: evolución en la clasificación ABCDE], que pueden coincidir con los cambios morfológicos de la lesión que a su vez pueden ser un indicativo del incremento dimensional e intensificación de la malignidad; (e) identificar dentro de una misma lesión, áreas sospechosas que puedan señalar distintos estadios, extensión, o profundidad del melanoma y (f) establecer comparaciones con imágenes de una base de datos¹¹.

Para identificar áreas de color uniforme, es necesario establecer un mínimo de variabilidad entre las distintas áreas cromáticas. Para ello es necesario recurrir a la Desviación Estándar entre los distintos puntos de medición aplicados a la fórmula triestimulante, mediante una única medida estadística conocida como el MCDM (MCDM: *Mean Color Differences from the Mean*), así que para cada imagen se obtendrá un único valor MCDM, como medida de variabilidad entre los puntos de una misma área (Ecuación 1).

$$MCDM = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(L_i^* - \bar{L}^*)^2 + (a_i^* - \bar{a}^*)^2 + (b_i^* - \bar{b}^*)^2}}{n} \quad (1)$$

Donde: L*: Claridad; a*: Coordenadas cromáticas en el eje rojo-verde; b*: Coordenadas cromáticas en el eje azul-Amarillo; n: Número de muestras.

¹⁰ Ver serie ISO 11664; <https://www.iso.org/committee/55238/x/catalogue/>.

¹¹ En nuestro caso se utilizó la base de datos: “HAM10000_images_part_1.zip”, *The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions*, <https://doi.org/10.7910/DVN/DBW86T/XJZSQ6>, Harvard Dataverse, V3

La medida del MCDM permite establecer no solo distinciones entre áreas de color uniformes, sino que se constituye en una medida práctica de evaluación de las posibles variaciones en una misma área, un control cruzado para determinar puntos homogéneos y una medida de control de calidad de los datos.

Para distinguir las diferencias entre dos puntos cromáticos (ΔE) en una misma lesión, es necesario recurrir a las fórmulas diferenciales más reconocidas de la CIE. Hasta hace unas décadas la distinción entre dos puntos cromáticos, por ejemplo, en el espacio CIE-L*a*b*, bastaba con establecer la diferencia euclidiana entre dos puntos del espacio de color ($\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*}$)¹² o su diferencial de atributos ($\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta C + \Delta H}$)¹³. Sin embargo, en años recientes, se ha demostrado que existen una cantidad de factores que es necesario tomar en cuenta para precisar mejor las diferencias entre dos puntos cromáticos, de ahí que la más reciente fórmula de diferencial cromático, denominada CIEDE2000 (ΔE_{00}) sea la fórmula más adecuada, recomendada por la CIE para establecer diferencias cromáticas (Ver Apéndice 1).

La fórmula del diferencial cromático CIEDE2000, tiene la particularidad de que es sensible a elementos recién descubiertos relativamente, como lo es el decaimiento en ciertos tonos azules que la forma euclidiana no contemplaba, aspecto que resulta de suma utilidad para distinguir los tonos azulados de los nevus melanocíticos, por ejemplo. Además, la fórmula CIEDE2000 mejora sustancialmente la precisión de las diferencias cromáticas entre dos puntos, y con base en la experiencia, se pueden definir niveles en distintos grados de tolerancia, a partir de los cuales se pueden establecer parámetros de diagnóstico vinculados a niveles de malignidad, riesgo y otros parámetros de control y apoyo diagnóstico al profesional dermatólogo, sobre todo muy apropiado en el desarrollo de la Teledermatología Diagnóstica.

Análisis de imágenes de lesiones melanocíticas: principios y práctica

La imagen de una lesión melanocítica obtenida en cualquier dispositivo implica que la imagen fue capturada bajo ciertas condiciones de iluminación con las características paramétricas del dispositivo. Sin embargo, para determinar la fidelidad de los colores y visualizarlo en un monitor o reproducirlo en una revista especializada, por ejemplo, hace falta algo más que la imagen en sí, pues es necesario disponer de colores de referencia, balancear los blancos (evitar los colores dominantes en el blanco y el negro), procesar las imágenes bajo estándares reconocidos y ajustar los perfiles de color entre los diferentes dispositivos de salida cuando de reproducirlos se trata.

Los colores de referencia son parches, escalas o patrones de color estándar de valores RGB conocidos, que son colocados junto al objeto, en este caso la lesión, y que al ser capturada la imagen quedan formando parte de la fotografía. Una vez que es capturada una imagen con las escalas de referencia, no es necesario seguir colocando los parches en las siguientes tomas fotográficas, si las condiciones no varían. En el proceso de captura de la imagen, un paso importante es el balance de blancos que en síntesis quiere decir que las partes más brillantes de la fotografía coincidan con el blanco neutro, y las partes más oscuras con el negro neutro, sin ninguna dominancia cromática. El formato en que las fotografías son archivadas debe ser tal que guarden la mayor cantidad de información posible de las mismas, es lo que se conoce

12 Donde: $\Delta L^* = L_1^* - L_0^*$; $\Delta a^* = a_1^* - a_0^*$; $\Delta b^* = b_1^* - b_0^*$.

13 Donde: La diferencia del croma es: $\Delta C_{ab}^* = C_{ab1}^* - C_{ab0}^*$; la diferencia del ángulo de tono es: $\Delta h_{ab}^* = h_{ab1}^* - h_{ab0}^*$; la diferencia de tono es:

$$\Delta H_{ab}^* = 2 \sqrt{C_{ab,1}^* C_{ab,2}^*} \sin\left(\frac{h_{ab}}{2}\right)$$

como formato RAW (cruda), sin comprimir. Estos archivos por lo general son bastante más pesados que un formato JPG, Tif o Pdf, pues almacenan los datos RGB sin compresión de pixel a pixel.

Al tener los valores RGB de la escala o cartilla, un software especializado puede ajustar las diferencias cromáticas, de tal forma que la imagen “procesada” refiera a una imagen fiel del original, creando un perfil de la imagen de referencia, y al ser aplicada a todas las demás fotografías que son tomadas bajo las mismas condiciones, las imágenes fotográficas serán ajustadas y fieles al original. Las imágenes así procesadas podrán ser abiertas, analizadas o reproducidas con gran fidelidad. Ahora bien, los dispositivos periféricos de salida como los monitores, pantallas táctiles de teléfonos inteligentes, impresoras de oficina, y otros sistemas de reproducción gráfica, tienen sus propios perfiles cromáticos de salida, los cuales hay que ajustar. Estos se ajustan de acuerdo con el tipo de dispositivo o sustratos (en el caso de las impresoras), y constituyen archivos de “entendimiento” entre dispositivos para fidelizar los colores de reproducción. Son los llamados perfiles ICC (ICC: *International Color Consortium*) que son archivos que comparan y uniformizan los colores de salida.

Para efectos del estudio que nos ocupa, los más importantes podrían ser quizás, los perfiles de los monitores, que deben ser calibrados para poder visualizar los colores de las lesiones melanocíticas pigmentadas que han de ser analizados por el experto dermatólogo.

Ahora bien, los datos de las coordenadas (RGB, XYZ o $L^*a^*b^*$) al ser almacenadas, guardan la información independientemente de la valoración subjetiva que puede hacerse de la lesión melanocítica pigmentada. Esta información puede ser analizada por diferentes algoritmos o aplicaciones informáticas, de tal manera que la información digital puede ser procesada fácilmente y quizás lo más importante es que los resultados de las mediciones pueden ser reproducibles.

La información de la captura de la imagen por un dispositivo fotográfico como el DigiEye®, cumple exactamente las mismas funciones que cualquier otro dispositivo de captura de imágenes. Al realizar un análisis comparativo entre las imágenes procesadas del DigiEye® y las procesadas por el software, se pueden evaluar la forma en que se podrían agrupar por zonas homogéneas aplicando criterios cromáticos.

Captura y procesamiento de imágenes

Las fotografías realizadas para este estudio fueron obtenidas con una cámara digital de la marca Canon, modelo EOS Revel T7®, con una resolución de 24 megapíxeles y mediante el uso de un objetivo Lente Macro Canon® EFS 60 mm para fotografías cercanas, a una distancia estándar de 10 cm. Las condiciones de iluminación se mantuvieron constantes mediante un aro de luz provisto con un iluminante LED S20Beauty Live a 5600 K de temperatura correlativa de color. Todas las imágenes fueron obtenidas en el formato RAW, en condición semi automática. Para la manipulación primaria de los archivos se utilizó la aplicación RawTherapee® 5.8.

Para realizar el equilibrio de blancos, corregir la exposición de la imagen y asegurar la fidelidad de los colores, se utilizó el patrón de colores Color Checker Nano X-Rite® (4X6 cm). El procesamiento digital de las fotografías se realizó mediante las herramientas de Adobe (PhotoShop®, Lightroom® y Camera RAW®).

Mediante PhotoShop® se transforma los archivos CR2, provenientes de la cámara, al formato DNG (Digital Negative Image), el cuál es el estándar para los programas de Adobe. Para la corrección de la exposición y el ajuste de blancos de la imagen del Colorchecker® se utiliza el programa Lightroom®. El ajuste de blancos es importante para eliminar cualquier dominante de color propio de las características del objetivo y la cámara. En este caso se realizó con el

gris neutro de la escala de grises del color de la Carta de Color. La corrección de la exposición asegura condiciones de iluminación estándar entre las diversas fotografías de la misma sesión, para que la temperatura de color sea semejante a la obtenida con el iluminante estándar D65. Esto se realizó mediante el ajuste de la exposición (Exposure) en el blanco de la escala de grises de la carta de color con respecto a las mediciones obtenidas utilizando el equipo VeriVide© DigiEye©, con un iluminante D65 a 10°. Incluyendo el ajuste en el negro (Blacks) de la escala de grises.

Procesamiento de imágenes digitales

En el caso de imágenes procedentes de una base de datos, por ejemplo, donde no se tiene control sobre los elementos de captura, estas pueden ser analizadas mediante un algoritmo especialmente diseñado. En este caso la fuente de datos de las imágenes puede provenir de distintas partes, que es el caso más común. Mediante la estandarización de los procedimientos para adquirir las imágenes, éstas ya vendrían debidamente calibradas y ajustadas, por lo que una aplicación informática común lo que haría es básicamente tomar los valores cromáticos (RGB, XYZ, $L^*a^*b^*$) y realizar, en el caso del análisis de las imágenes de lesiones melanocíticas, las respectivas valoraciones comparativas entre las distintas partes de la lesión.

La diferencia frente a una medición directa de la lesión es que un algoritmo podría aplicarse a toda el área, incluso pixel a pixel, incluir bordes y partes que anteriormente no se han medido en una mezcla complicada de colores. Una cantidad grande de tonos en una misma lesión puede ser relativamente fácil de analizar, y se podrían establecer zonas homogéneas más dispersas o pequeñas.

En la literatura existen múltiples propuestas para la estimación de las coordenadas cromáticas [17], para el caso que nos ocupa, en el algoritmo se utilizó el método de análisis para la concentración de valores mediante histogramas [18].

El procesamiento de imágenes mediante los histogramas se realiza en tres partes principales. Primero se aplica un umbral a las imágenes para obtener una máscara binaria (representación) de la lesión. Aquí se utiliza el llamado umbral de Otsu. Una vez calculada la máscara, en el siguiente paso se aplica nuevamente la imagen original. En el último paso se utiliza un histograma y se calcula el cambio. Esto aplica para todos los colores presentes en la lesión. Cuanto mayor sea la variación, mayor será el valor que se devuelve.

A partir de los datos estimados de esta manera, se pueden establecer múltiples valoraciones, inclusive como elementos de diagnóstico avanzado. Por ejemplo, para el análisis propiamente de las lesiones melanocíticas, en los tonos más oscuros y los azules, que según la literatura tienen una mayor implicación en el melanoma, el algoritmo cuenta con un peso. Cuanto más oscuro sea el tono, mayor valor representa para el resultado general. Sin embargo, un algoritmo como el mencionado, que no contemple los ajustes de grises y blancos, solo analizará los datos crudos de la imagen, de ahí que los resultados contemplarían el error de origen por falta de corrección.

Medición comparativa de imágenes

Para identificar algunos de las dificultades de análisis mencionadas, se introdujeron las imágenes capturadas en el DigiEye© sin procesar, y se analizaron mediante el algoritmo desarrollado (ver tabla 1), comparando los datos con los analizados con el DigiPig©.

La imagen utilizada fue la de una carta de Color (Figuras 1.a) y 1.b) Colorchecker®, para ajustar los valores en cada uno de los parches de color. La salida de este programa es la creación de un perfil en donde se encuentran los valores de referencia de cada uno de los colores en las condiciones de iluminación establecidas. El perfil de color se utiliza en el programa Lightroom® para el análisis de cada una de las fotografías de las muestras pertenecientes a la misma sesión.

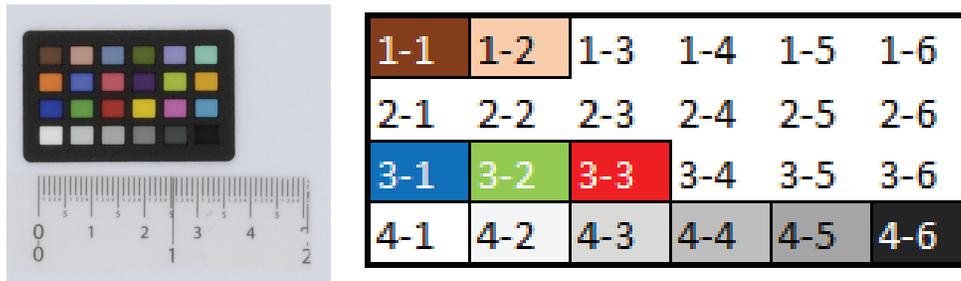


Figura 1. a) Checker Nano X-Ride® (4X6 cm) y b) clasificación numérica de los parches.

En esta serie de mediciones se realizaron cuatro lecturas por cuadro de color con cuadrados independientes de 1 mm por 1 mm. Empezando en el cuadro superior izquierdo y avanzando hacia la derecha en cada fila, hasta completar las cuatro filas de los cuadros de color, que posteriormente se guardaron en un archivo de Excel en formato “csv”.

Los parches 1-1 y 1-2 son colores piel (importantes para la valoración de lesiones en la piel) los parches 3-1, 3-2 y 3-3 corresponden a los parches puros de RGB (se justifican porque el análisis se realiza en un monitor o dispositivo electrónico), y finalmente, los seis colores en escala de grises (para el ajuste de blancos y la exposición) (cuadro 1).

Cuadro 1. Cuadro comparativo entre las mediciones cromáticas realizadas con el DigiEye® y mediante un algoritmo en parches seleccionadas de un ColorChecker® Classic.

Cuadro	Mediciones mediante algoritmo				Mediciones DigiEye® Classic (5xC)				DE ₀₀
	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM	
NF1-1	33,65	9,77	13,64	2,43	37,39	13,32	12,02	0,36	4,92
NF1-2	65,34	10,88	13,44	2,03	65,69	16,37	14,77	0,38	4,21
NF3-1	30,86	25,61	-52,53	2,24	51,65	-3,08	-21,30	19,68	6,38
NF3-2	59,74	-32,25	37,58	1,86	54,94	-31,66	33,32	4,30	2,81
NF3-3	50,80	38,54	12,14	2,03	40,79	45,95	24,01	13,99	3,54
NF4-1	87,61	-0,88	1,51	1,91	95,63	-0,77	2,38	0,88	5,88
NF4-2	78,37	-0,94	-0,33	1,94	81,15	-0,77	0,05	0,42	3,08
NF4-3	68,58	-0,61	-0,41	1,95	67,47	-0,61	-0,06	0,35	6,58
NF4-4	53,55	-0,54	0,12	2,16	51,31	0,34	0,07	0,89	2,06
NF4-5	32,76	-0,50	-0,62	2,53	36,37	0,57	-0,57	1,08	4,38
NF4-6	9,28	-0,07	-0,32	2,80	19,92	1,74	-0,99	1,93	2,46

En el cuadro 1, se introdujeron los valores MCDM para cada método de análisis, así como los valores del cálculo de las diferencias de color mediante la fórmula CIEDE2000 (ΔE_{00}), cuya escala de valoración permite establecer las diferencias entre los diferentes tonos de los parches seleccionados en ambos métodos.

Metodología de detección cromática de lesiones melanocíticas

En forma general, la detección de lesiones melanocíticas pigmentadas a partir de lecturas exclusivamente cromáticas se lleva a cabo en tres grandes fases que se detallan a continuación:

Fase 1: Identificación de segmentos homogéneos de lesiones pigmentadas de referencia

Una vez que se han obtenido las imágenes debidamente calibradas y ajustadas de lesiones pigmentadas, es necesario identificar áreas o secciones homogéneas dentro de ellas para el posible establecimiento de patrones que puedan asociarse con un tipo de clasificación específica, y que pueda brindar una mejor idea del tipo, extensión, severidad y otras características, de tal modo que pueda desembocar en un diagnóstico acertado (Figura 2).

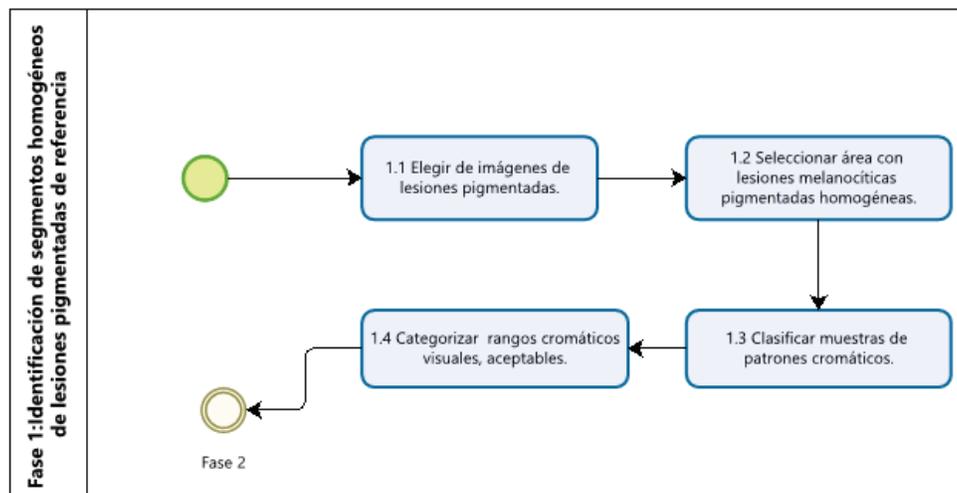


Figura 2. Diagrama de la Fase 1: Identificación de segmentos homogéneos en lesiones pigmentadas de referencia.

El proceso de identificación de segmentos homogéneos en las imágenes pasa por un proceso de tres etapas principales, en donde se puedan establecer los patrones básicos de identificación y caracterización de las imágenes.

La primera etapa dentro de esta fase (1.1) lo constituye la Selección y clasificación de segmentos homogéneos de lesiones pigmentadas, incluyendo rangos aceptables de evaluación, en un proceso de cuatro pasos:

1. Elegir imágenes de lesiones pigmentadas que muestren patrones cromáticos típicos: se identifican y seleccionan imágenes que previamente valoradas y clasificadas como lesiones típicas. El objetivo es crear las imágenes patrón donde los colores son claramente identificados en ellos.
2. Seleccionar el área de las lesiones melanocíticas pigmentadas que muestran homogeneidad cromática: las imágenes son segmentadas en áreas homogéneas con características similares. En una misma imagen pueden seleccionarse varias secciones con distintos estadios y tipos de lesiones.
3. Clasificar muestras de patrones cromáticos: se toman muestras de color homogéneo de distintas lesiones melanocíticas y se clasifican por familias, las cuales representan un mismo tipo de lesión y su estadio. Se calcula el tamaño de la muestra representativa, con mayor uniformidad de las mediciones.

4. Categorizar bajo criterio experto, los rangos cromáticos visuales, aceptables bajo una misma categoría: Expertos dermatólogos deberán clasificar los “rangos cromáticos” bajo los cuales se podría decir que corresponden a un mismo tipo de lesión melanocítica, en un “estadio similar”. Esta primera clasificación es una clasificación visual con criterio experto, cuyas muestras deberán ser validadas por expertos independientes.

La segunda etapa de esta fase (1.2), es la caracterización de segmentos cromáticos homogéneos de lesiones pigmentadas, mediante histogramas de dispersión y lecturas estadísticas a partir de las coordenadas cromáticas. En un proceso en tres partes:

5. Determinación de coordenadas CIELAB de las secciones homogéneas: aquí cada sección es medida en al menos 20 puntos distintos (i) de la superficie, aproximadamente equidistantes entre sí, de tal manera que puedan determinarse las coordenadas L^* , a^* , b^* promedio.

En la figura 3 se han seleccionado como ejemplo áreas de segmentos homogéneos. En cada uno de los tres puntos se han determinado las coordenadas cromáticas $L^*a^*b^*$. En la tabla 2 se presentan los valores promedio determinados en una pequeña área de 1 mm^2 que se muestran en el plano cartesiano de la figura 4.

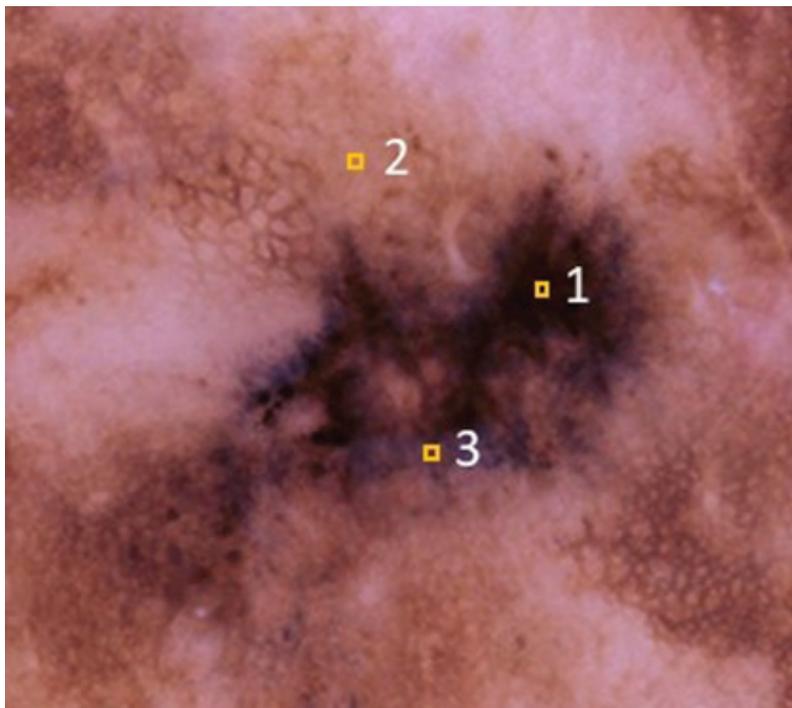


Figura 3. Tres puntos seleccionados para la medición de las coordenadas de color $L^*a^*b^*$. Fuente de la fotografía de la lesión: Tschandl, Philipp, 2018.

Cuadro 2: Valores promedio de las coordenadas $L^*a^*b^*$ en tres regiones homogéneas de una imagen de una lesión melanocítica.

Coordenadas cromáticas	Punto 1	Punto 2	Punto 3
L^*	4,0	59,0	25,6
a^*	8,1	24,7	17,5
b^*	3,3	13,3	-13,8
			

Obsérvese que el punto 2 presenta un mayor valor de la coordenada L^* , pues es un punto más claro. Con respecto a la coordenada a^* , el punto 2 presenta una coordenada positiva y mayor que en el punto 1, pues tiene un alto componente del color rojo. En el punto 3, la coordenada es negativa porque en la lesión se aprecia una coloración azulada. Las diferencias de color entre los puntos 1, 2 y 3 se determinan con la fórmula CIEDE2000 (cuadro 3).

Cuadro 3. Mediciones de las diferencias de color entre los puntos seleccionados

Diferencias entre puntos de medición	CIEDE2000 (ΔE_{00})
Entre P1 y P2 	44,917609
Entre P1 y P3 	19,180309
Entre P2 y P3 	31,688907

- Determinación de las lecturas cromáticas a partir de histogramas: Esta sección permite validar las lecturas anteriores y establecer un único valor cromático (y eventual tolerancia) al menos con 4σ , para cada imagen de referencia. Los histogramas se pueden realizar a partir de las lecturas R, G, B de las diferentes áreas de las imágenes seleccionadas, esto ayudará a establecer la lectura característica de cada una de ellas, y a partir de esta lectura se determina la coordenada en el espacio de color CIELAB (figura 4).

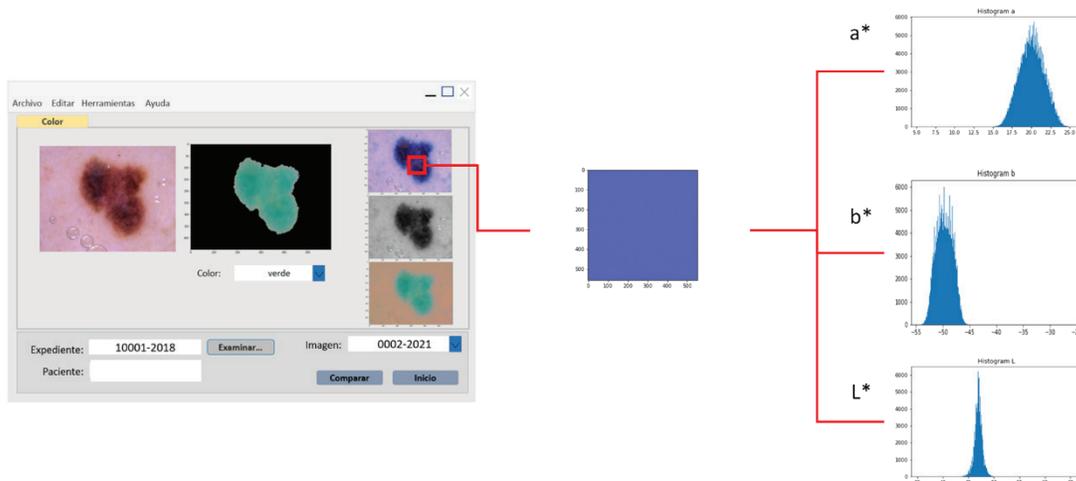


Figura 4. Histogramas de las coordenadas $L^*a^*b^*$ de un parche de color extraído de un filtro de una imagen de una lesión melanocítica (imagen con fines ilustrativos).

7. Establecimiento del método de lectura comparativa con distintas muestras: Para determinar la comparación de muestras se utiliza la fórmula diferencial cromática CIEDE2000 (ΔE_{00}), para obtener las diferencias y tolerancias (Tabla 3, columna CIEDE2000).

Fase 2: Asociación de segmentos homogéneos con tipos de lesiones pigmentadas

La segunda fase, que permite propiamente la asociación de segmentos homogéneos con los distintos tipos de lesiones pigmentadas, está dividida en tres procesos:

1. Identificación de lesiones pigmentadas: En esta etapa se seleccionan lesiones pigmentadas reales (distintas a las utilizadas en la sección anterior), que serán sometidas a las valoraciones comparadas cromáticas. Se deberá seleccionar con base en una muestra significativa, para determinar la validez del mecanismo de identificación. Se pretende que sean adquiridas mediante condiciones controladas establecidas en la primera sección (aunque las pruebas iniciales podrán ser seleccionadas a partir de bases de datos predeterminadas).

En este caso, la muestra significativa deberá ser calculada, a fin de establecer la validez del experimento. En caso de ser necesario (cuando son bases de datos no públicas, o pacientes de algún experto) se recurre a los protocolos establecidos para tal situación.

2. Caracterización de lesiones pigmentadas con base en la identificación de secciones homogéneas: Las imágenes de lesiones pigmentadas son seccionadas en secciones homogéneas, y comparadas con las bases de datos de colores homogéneos. Podrán realizarse estudios con base al criterio experto, ajeno a los utilizados en la fase anterior. La comparación se realiza para establecer el tipo, estadio y severidad de las lesiones.
3. Una vez que están debidamente identificadas, sus coordenadas cromáticas son medidas en puntos equidistantes. A partir de esta lectura son comparadas con las imágenes de muestra establecidas en el proceso 1.1. y 1.2, mediante la fórmula CIEDE2000 (ΔE_{00}). Con base en estas lecturas, se establece su pertenencia a la categoría específica.
4. Determinación del grado de malignidad con base en las características pigmentadas en secciones homogéneas: En este punto del proceso, basándose en la determinación cromática de las secciones homogéneas, se identifican las lesiones pigmentadas con diferentes grados de malignidad, y se validan con expertos.

5. Aplicación de la metodología a la caracterización de secciones heterogéneas: En esta última fase de la segmentación se someten a pruebas diagnósticas, las lesiones melanocíticas con características cromáticas múltiples, cuya heterogeneidad permite establecer diferencias por secciones y hacer una valoración amplia de las lesiones pigmentadas a fin de validar el método.

Fase 3: Integración

En esta fase se pretende asociar los resultados de la anterior fase con características del sistema ABCDE (especialmente al color) con otros mecanismos para identificación y clasificación de melanomas; prácticamente, en todas ellas de alguna manera está involucrado el color. La integración combinada de características morfológicas, dimensionales y de aspecto, seleccionadas a partir de una identificación metodológica paralela, junto con la caracterización cromática permite establecer el diagnóstico apropiado.

Los valores cromáticos extraídos de las fases anteriores pueden servir de insumo para realizar análisis comparativos y establecer similitudes entre distintos métodos de valoración que utilicen el color como base para sus análisis.

Conclusiones

El análisis clínico por parte de los especialistas en dermatología cuenta con técnicas instrumentales y metodológicas que, sobre todo en las últimas dos décadas, viene desarrollando importantes progresos, mejorando el diagnóstico clínico significativamente. Sin embargo, la caracterización cromática de las lesiones melanocíticas y su valoración experta sigue siendo en gran medida subjetiva.

La valoración cromática de las lesiones melanocíticas es determinante en la identificación del tipo de melanoma y su malignidad en toda consulta dermatológica, de ahí que la determinación precisa de sus coordenadas, así como las diferencias que presenta dentro de la misma lesión y la piel circundante puede resultar de mucha ayuda al profesional en dermatología para establecer las patologías asociadas, los grados de avance en periodos determinados y los registros para interconsultas específicas.

Las coordenadas cromáticas de las distintas tonalidades de una lesión melanocítica, indistintamente del método que se utilice, serán prácticamente las mismas, siempre que utilicemos en lo posible los mismos instrumentos, y el mismo sistema de gestión cromática como el propuesto, es decir, las mediciones son reproducibles.

A partir de los estándares desarrollados por la CIE, es posible establecer con precisión, las coordenadas cromáticas de cada uno de los puntos dentro de una lesión melanocítica, de tal forma que pueden establecerse diferencias entre sus distintas partes, asociar tonalidades con grados de malignidad e incluso abrir la posibilidad de observar su evolución mediante los resultados diferenciales y su variabilidad a través del tiempo.

Para desarrollar un adecuado análisis cromático de las lesiones melanocíticas es necesario establecer las condiciones de captura y procesamiento de las imágenes que nos permitan ajustar los parámetros de iluminación y observación, así como ajustar los perfiles de los distintos dispositivos para evitar distorsiones, que puedan incidir en un diagnóstico errado.

La medición comparativa de datos cromáticos realizada mediante el cálculo de variables mediante un algoritmo especialmente diseñado, en contraposición de las mediciones directas en un dispositivo como el DigiEye®, permite establecer las diferencias de distintos métodos objetivos de análisis cromático, que pueden ser utilizados en la valoración profesional de lesiones melanocíticas pigmentadas.

La detección cromática de lesiones melanocíticas en tres fases establece una metodología objetiva que puede aplicarse a todo tipo de dispositivos, permitiendo la eliminación de distorsiones procedentes de las condiciones de iluminación, y a su vez asociar segmentos homogéneos con tipos específicos de lesiones pigmentadas. Sus resultados permiten integrar distintos sistemas de identificación y clasificación de melanomas, facilitando su caracterización y diagnóstico.

Discusión

La profesionalización de la valoración cromática objetiva de lesiones pigmentadas requiere por parte del profesional en dermatología, la adquisición de competencias que normalmente no son parte de su formación profesional. Pensar en términos cromáticos es pensar en tres dimensiones a la hora de ubicar las coordenadas cromáticas, y analizar sus diferencias. También, requiere el desarrollo de destrezas para asociar tonos y combinaciones de tonos con características típicas de los melanomas.

Adicionalmente, será importante el desarrollar habilidades para determinar las posibles distorsiones, desviaciones o errores que pueden derivarse de un análisis subjetivo de imágenes que no han sido procesadas o referenciadas adecuadamente.

Los algoritmos de análisis de datos procedentes de imágenes, así como la Inteligencia Artificial, se vislumbran como uno de los pilares de la medicina del futuro, sin duda serán un apoyo importante al profesional dermatólogo. Sin embargo, imágenes no ajustadas pueden llevar, al igual que si se realizara en forma subjetiva, a conclusiones erradas que pueden derivar en diagnósticos con consecuencias indeseadas.

Referencias

- [1] Ureña Vargas, M. J., Sánchez Carballo, R., Kivers Bruno, G. Cerdas Soto, D., & Fernández Angulo V. “*Cáncer de piel: revisión bibliográfica*” Revista Ciencia Y Salud Integrando Conocimientos, Vol. 5, Num. 5 (2021), Pág. 85-94. https://doi.org/10.34192/ciencia_y_salud.v5i5.347
- [2] Zekayi K., Burhan E., Server S. and Yalçın T. “Current Management of Malignant Melanoma: State of the Art”; Chapter 4; IntechOpen Books Series pp. 69 (2013).
- [3] Glenn Merlino et. All. “The state of melanoma: challenges and opportunities”; Journal of Pigment Cell & Melanoma Research, Vol. 29 Issue 4; pp. 404-416, (2016).
- [4] Naomi Ch. Et all. “Teledermatology for diagnosing skin cancer in adults”; The Cochrane Library Collaboration. Published by John Wiley & Sons, Ltd. (2018)
- [5] A.P. Kassianos, J.D. Emery, P. Murchie, F.M. Walter; “*Smartphone applications for melanoma detection by community, patient and generalist clinician users: a review*”. British Journal of Dermatology, BJD. 172, pp. 1507-1518, (2015).
- [6] Titus J. Brinker et all. “Deep learning outperformed 136 of 157 dermatologists in a head-to-head dermoscopic melanoma image classification task”. European Journal of Cancer 113; 47-54(2019).
- [7] David E. Elder et all. “*The 2018 World Health Organization Classification of Cutaneous, Mucosal, and Uveal Melanoma*” College of American Pathologists, “Archives of Pathology & Laboratory Medicine” Review (2020)
- [8] H.P. Soyer, R.P. Braun, G. Argenziano. “*First Congress of the International Dermoscopy Society (IDS)*” Dermatology Journal pp. 212:265–320, (2006).

- European consensus-based interdisciplinary guideline for melanoma. Part 1: Diagnostics e Update European Journal of Cancer (2019)
- [9] European consensus-based interdisciplinary guideline for melanoma. Part 1: Diagnostics e Update European Journal of Cancer (2019)
- [10] John D. Mollona , Jenny M. Bostenb , David H. Peterzellc , Michael A. Webster. “*Individual differences in visual science: What can be learned and what is good experimental practice?*” *Visión Research*. Vol. 141, (2017) Pages 4-15.
- [11] Pasmarter N, Munakomi S. Physiology, Color Perception. [Updated 2021 Sep 18]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544355/>
- [12] Ellen J. Gerl & Molly R. Morris. “*The Causes and Consequences of Color Vision*” *Evo Edu Outreach* (2008) 1:476–486.
- [13] Mike Webster. “*Environmental Influences on Color Vision*” *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer Science+Business Media NY (2015) p. 1-6.
- [14] Andrew Stockman, “Cone fundamentals and CIE standards”; *Behavioral Sciences*, 30:87–93 (2019).
- [15] P. Capilla, J.M. Artigas, J. Pujol. “Fundamentos de colorimetría”. Ed. Universitat de Valencia, (2002).
- [16] O. O. Olugbara, T. B. Taiwo, and D. Heukelman. “Segmentation of Melanoma Skin Lesion Using Perceptual Color Difference Saliency with Morphological Analysis”. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* Vol. (2018).
- [17] Annaby, M.H., Elwer, A.M., Rushdi, M.A. et al. Melanoma Detection Using Spatial and Spectral Analysis on Superpixel Graphs. *J Digit Imaging* 34, 162–181 (2021). <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1007/s10278-020-00401-6>
- [18] Soumya, R. S., Neethu, S., Niju, T. S., Renjini, A., & Aneesh, R. P. (2016, July). Advanced earlier melanoma detection algorithm using colour correlogram. In 2016 International Conference on Communication Systems and Networks (ComNet) (pp. 190-194). IEEE.

Apéndice 1: Fórmula diferencial CIEDE2000 (ΔE_{00})

La fórmula CIEDE2000 (ΔE_{00}) [ver ecuación 2] es una fórmula evolucionada de la fórmula ΔE , y actualmente es reconocida como una norma ISO (ISO/CIE 11664-6:2014)

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad (2)$$

Donde:

$$\Delta L' = L_1^* - L_2^* \quad y \quad L' = L^* \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{(L_1^* + L_2^*)}{2} \quad y \quad \bar{C} = \frac{(C_1^* + C_2^*)}{2} \quad (4)$$

$$\bar{C}' = \frac{(C_1' + C_2')}{2} \quad y \quad \Delta \bar{C}' = (C_1' - C_2') \quad (5)$$

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad y \quad C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2} \quad (6)$$

$$a'_1 = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{\prime 7}}{\bar{C}^{\prime 7} + 25^7}} \right) \quad (7)$$

$$a'_2 = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{\prime 7}}{\bar{C}^{\prime 7} + 25^7}} \right) \quad (8)$$

Los factores paramétricos bajo condiciones de referencia en los que usualmente adquieren los valores de 1 (Ecuación 9).

$$K_L = K_C = K_H = 1 \quad (9)$$

El Índice de compensación de la Claridad (S_L)

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}} \quad (10)$$

Índice de compensación del Croma (S_C)

$$S_C = 1 + 0,045C \quad (11)$$

Índice de compensación del Matiz (S_H)

$$S_H = 1 + 0,015CT \quad (12)$$

Donde:

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$h'_1 = \text{atang2}(b_1^*, a'_1) \pmod{360^\circ} \quad (13)$$

$$h'_2 = \text{atang2}(b_2^*, a'_2) \pmod{360^\circ}$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 \pm 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, \quad h'_2 - h'_1 \end{cases}$$

Nota: Cuando C_1' o C_2' son cero, Δh también es irrelevante ya que tiende a cero.

$$H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)$$

Nota: Cuando C_1' o C_2' son cero, \bar{H} también $\Delta h'$ no se divide entre 2 (Ecuación 2).

Diseño de dos propuestas de obras de conservación de suelos para mitigar daños en un terreno con problemas de erosión tipo cárcava, Zona de Los Santos, Costa Rica

Design of two proposals for soil conservation works to mitigate damage in a land with gully-type erosion problems, Los Santos area, Costa Rica

Mariela Chinchilla-Ureña¹, Isabel Guzmán-Arias²,
Fernando Watson-Hernández³, Catalina Vargas-Meneses⁴

Fecha de recepción: 5 de septiembre, 2022
Fecha de aprobación: 3 de febrero, 2023

Chinchilla-Ureña, M; Guzmán-Arias, I; Watson-Hernández, F; Vargas-Meneses, C. Diseño de dos propuestas de obras de conservación de suelos para mitigar daños en un terreno con problemas de erosión tipo cárcava, zona de los santos, costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 124-136.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6376>

- 1 Universidad Estatal a Distancia/Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: machinchilla@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5326-864X>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: iguzman@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5553-3977>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fwatson@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>
- 4 Universidad Estatal a Distancia. Correo electrónico: cvargasm@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8555-4496>

Palabras clave

Conservación de suelo; cárcava; erosión del suelo; café.

Resumen

La conservación del recurso suelo, representa una medida de prevención en el aprovechamiento adecuado para las poblaciones actuales y futuras, sin embargo, en los últimos años es cada vez más común el impacto del cambio climático; con daños tangibles y muchas veces difíciles de superar. Adicionalmente, los productores no siempre cuentan con las herramientas y el soporte técnico para hacer un uso combinado de la práctica productiva con la conservación suelo y esto impide las acciones preventivas ante la acelerada erosión del suelo por el agua. En este artículo, se presentan dos propuestas de diseño de obras de conservación de suelo que buscan mitigar los daños presentes en una finca en San Pedro de Tarrazú, Costa Rica, donde se encuentra la problemática de erosión de suelo de tipo cárcava. Se determinaron variables hidrológicas y características del suelo en estudio para hacer el cálculo de pérdida de suelo por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE), dando como resultado, una pérdida de suelo en promedio de 20,54 Toneladas por hectárea al año. De ahí que la implementación de las obras de conservación diseñadas son la clave para reducir la pérdida de suelo significativamente. Estas obras consistieron en el diseño de terrazas, zanjas de infiltración tipo trampa, barreras vivas, cultivos a contorno y árboles para sombra y amarre de suelo.

Keywords

Soil conservation; gully; soil erosion; coffee.

Abstract

The conservation of the soil resource represents a preventive measure in the adequate use for current and future populations, however, in recent years the impact of climate change is increasingly common; with damage are tangible and often difficult to overcome. Additionally, producers do not always have the tools and technical support to make a combined use of the productive practice with soil conservation and this prevents preventive actions in the face of accelerated soil erosion by water. In this article, two design proposals for soil conservation works are presented that seek to mitigate the damage present on a farm in San Pedro Tarrazú, Costa Rica, where the problem of gully-type soil erosion is found. Hydrological variables and characteristics of the soil under study were determined to calculate soil loss by means of the universal soil loss equation (RUSLE), resulting in an average soil loss of 20.54 tons per hectare per year. Hence, the implementation of the designed conservation works is the key to significantly reduce soil loss. These works consisted of the design of terraces, trap-type infiltration ditches, live barriers, contour crops and trees for shade and soil tying.

Introducción

La intensidad de la erosión del suelo está determinada por las características fisiográficas como lo es la pendiente e hidrológicas de un área de captación, como la cantidad de lluvias presentes en una zona, estas características reunidas hacen que la Zona de Los Santos en general sea una zona propensa a deslizamiento por sus condiciones de alta pendiente y ubicado en un país tropical, registrando datos de alta intensidad de precipitación durante la estación lluviosa. Los daños consecuencia del cambio climático son tangibles y graves según [1] cada año ocurre una reducción anual en los rendimientos de los cultivos del 0,4% al 0,8%. La problemática de

la pérdida de suelo en Costa Rica, se evidencia con las cifras de la comisión asesora sobre degradación de tierras (CADETI), las cuales, dictaminan que “Cerca de unos 110 kilómetros cuadrados de la geografía costarricense están afectados por la erosión, deslaves, pérdida de fertilidad y otros fenómenos asociados al suelo a través de un alto impacto referente a la producción agropecuaria...”[2]. La erosión que causa la escorrentía de agua es un problema recurrente en las áreas agrícolas, especialmente en las zonas montañosas [4]. Para el estudio en cuestión, con el fin de plantear estrategias al cambio climático a una finca dedicada al cultivo de café, en la cual se presentan altas pendientes (con valores que rondan desde los 23% hasta 31%) en la mayor parte de su extensión territorial, y dar solución a la formación de caravas; tipo de erosión hídrica que consiste en canales superficiales formados cuando los arroyuelos se combinan, se desarrollan al grado de que no pueden ser eliminadas por las operaciones normales de labranza [3] Mexico, is a semi-arid area located west of the Sierra Madre Oriental and exhibits severe erosion. Remontant gully erosion occurring in two agricultural soils (Chihue and Alamar.

Los factores involucrados en estos procesos de erosión son textura del suelo, conductividad hidráulica, precipitación máxima, cobertura, erodabilidad, erosividad, pendiente, entre otros; a partir de estos factores se utiliza la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE) [5], que evidencia que en la finca con las condiciones actuales se pierde una cantidad considerable de suelo. Esta pérdida de suelo genera una afectación directa sobre el productor, ya que, los rendimientos del cultivo disminuyen y provocando una mayor inversión en el uso de fertilizantes y agroquímicos, aumentando costos y disminuyendo los ingresos. Por tales razones se utilizó el método RUSLE para cuantificar la pérdida de suelo y de esta manera proponer el diseño de dos esquemas o planes de estructuras que ayudarán a mitigar y controlar los problemas de erosión presentes en el área de estudio, con esto se logra determinar si los procesos de escorrentía y erosión del suelo tienen efectos en el sitio y fuera del sitio que podrían amenazar la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en una cuenca. La comprensión de la escorrentía basada en eventos y la erosión del suelo ayudan a administrar los esquemas existentes de recolección de agua [6].

Metodología

Características de la zona de estudio

La zona en estudio pertenece a una microcuenca ubicada en la Zona de Los Santos, específicamente entre los cantones de Dota y Tarrazú. Este sector del país que se distingue por su producción cafetalera, se caracteriza por una época lluviosa de siete meses (mayo a noviembre) y seca (diciembre a abril) bien definidas, situación que favorece la floración del café, además la altitud óptima para el cultivo de café se encuentra entre los 500 y 1700 msnm, por encima de este nivel altitudinal se presentan fuertes limitaciones en relación con el desarrollo de la planta [7]. Sin embargo, en la zona de los santos se siembra café a altura mayores y menores de las recomendadas, dicho caso se da en la finca en estudio donde se presentan alturas desde los 1715 y 1835 msnm.

Además, al ser parte de un país tropical se presentan altas precipitaciones, en promedio la precipitación es de 2.400 milímetros por año, con una temperatura promedio anual de 19°C según datos del ICAFE [7]. La temperatura promedio anual favorable para el cafeto se ubica entre los 17 a 23 °C. Temperaturas inferiores a 10 °C, provocan clorosis y paralización del crecimiento de las hojas jóvenes. Por otra parte, las precipitaciones mayores de 3000 mm, la calidad física del café puede comenzar a verse afectada. Por lo que, la zona de los santos reúne las características de precipitación y temperatura adecuadas para el buen desarrollo de la planta de café.

Cuantificación de la erosión

La erosión del suelo, a menudo es impulsada por el exceso de escorrentía superficial, los agentes erosivos, que se relacionan con la erosión hídrica como la precipitación, la cobertura vegetal, la topografía y las propiedades del suelo; la interacción entre ellos determina la magnitud y la tasa de erosión del suelo. La presencia de cobertura vegetal juega un papel importante en la prevención de la erosión del suelo, debido a que esta incrementa la resistencia del suelo al aumentar el contenido de materia orgánica. Es por esta razón, que es importante hacer la clasificación de uso de suelo, para comprender mejor el manejo de la finca y además tener cuantificados y caracterizados todos los factores que intervienen en el proceso de pérdida del suelo; según la metodología de la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE).

Para cuantificar la pérdida de suelo con las condiciones actuales de la finca, en la cual no se aplican hasta el momento ninguna práctica de conservación de suelo, se determinan los factores de: Erodabilidad (K), Erosividad, Cobertura, topografía (LS), prácticas de conservación (P), Condición hidrológica, infiltración potencial máxima (S) y la escorrentía potencial, se introducen a la ecuación universal de pérdida de suelo que corresponde a:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde:

A es la media de la pérdida de suelo anual en, ton/ha/año, K es erodabilidad del suelo en, t ha h/ha MJ mm, L es el factor de longitud de cuesta, S es el factor de pendiente de cuesta, R es el factor de erosividad de la lluvia en, MJ mm/ha h, C es el factor vegetación y P es el factor de prácticas de apoyo o manejo del suelo. [8]

El factor de Erodabilidad (K)

Se obtuvo con los valores de porcentaje limos más arenas muy finas, porcentaje de arenas, materia orgánica, estructura del suelo y permeabilidad se utilizó la siguiente ecuación para determinar su valor:

$$K = \frac{([2,1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1,14} + 3,35 * (s - 2) + 2,5 * (p - 3)])}{100} \quad (2)$$

Donde:

M: (%limo + %amf) *(100-%arcilla). K = Erodabilidad ((ton*acre*h)/(100*acre*ft*tonf*in)). OM= porcentaje de materia orgánica (m). S = estructura del suelo. P= permeabilidad. K=0 suelo muy erosionado. K=1 suelo muy erosionado.

El Factor de erosividad

Se obtuvo teóricamente de datos de una estación en Copey de Dota los cuales se encontraron en un documento llamado “el potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica” [9] y se multiplicó por un factor de 0,1702 para convertir el valor al Sistema Internacional de unidades.

Factor de cobertura

Se determinó el ciclo fenológico del cultivo, en este caso café para relacionar cada etapa del ciclo con un factor de manejo de cultivo apropiado y así finalmente realizar una ponderación de este a lo largo del tiempo total del ciclo de cultivo.

Factor de topografía (LS)

El cálculo del factor L se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$L = \left(\frac{x}{72,6}\right)^m \quad (3)$$

Donde:

L= factor de longitud de la zona de estudio. X= proyección horizontal de la zona de estudio (ft).

M= exponente del factor L de la zona de estudio.

Para obtener el exponente m se utilizó la Ecuación 4.

$$m = \frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}\theta + 0,269(\text{sen}\theta)^{0,8} + 0,05} \quad (4)$$

Donde:

m= exponente del factor L. θ = ángulo de la pendiente (grados).

El factor de inclinación se calculó con la siguiente, debido a la ladera tiene pendiente mayor al 9%.

$$S = 16,8 \cdot \text{sen}\theta - 0,5 \quad (5)$$

Donde:

S= factor de inclinación.

θ = ángulo de la pendiente (grados).

Se determinaron los valores correspondientes a las variables de práctica de conservación (P), tomando en consideración la pendiente y la forma del cultivo.

La condición hidrológica se determina la cobertura vegetal, y el grupo de suelo que corresponde al de la zona de estudio según la tasa de infiltración, luego, se determinó la condición de humedad antecedente (CHA), lo que permite clasificar el número de curva.

Con respecto a la infiltración potencial máxima, se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \left[\frac{1000}{NC} - 10\right] * 2,54 \quad (6)$$

Donde:

S: Infiltración potencial (cm).

NC: número de curva

Por último, la escorrentía potencial de acuerdo con el método de número de curva, la escorrentía de diseño se obtiene mediante la ecuación 7 que se muestra a continuación:

$$E = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (7)$$

A partir de que se conoce la situación actual en la finca, con respecto a la pérdida de suelo, se procede a diseñar dos propuestas, que consistieron, la primera en utilizar varias prácticas de conservación de suelos que trabajan mejor en conjunto, las cuales son: Zanjas de infiltración, barreas vivas, cultivos a contorno y árboles para sombra y amarre del suelo. Y la segunda consistió en el diseño de terrazas, con barreras vivas, y árboles para sombra y amarre del suelo.

Diseño de obras

Zanjas de infiltración

Con el dato del caudal obtenido por escorrentía, se toma el dato pendiente y el espaciamiento se establece según el ministerio de agricultura y riego el distanciamiento para terrenos con cobertura vegetal va desde los 11 m a los 30 m y sin cobertura vegetal desde los 12 m a los 45 m. El espaciamiento de la zanja está dado por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1000bc}{(Q\cos(\alpha))} \quad (8)$$

Donde:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\text{pendiente}\%}{100} \right) \quad (9)$$

Se calculó el área de la zanja (bc) según la ecuación que se observa a continuación:

$$bc = a * Q * \cos(\theta) \quad (10)$$

Donde:

bc=área de la zanja (m²).

A= espaciamiento de la zanja (m).

Q= escorrentía (m).

Barreras vivas

Se determinó la longitud de las barreras en cada zona en dirección de la máxima pendiente. Después se determinó el factor a según la pendiente y el factor b tomando en cuenta la condición hidrológica. Con estos datos y la pendiente de cada zona se calculó el índice vertical mediante la ecuación de Hudson mostrada a continuación.

$$IV = a * P + b \quad (11)$$

Donde:

IV= índice vertical (m).

a y b = factores de pendiente y condición hidrológica.

P= pendiente (%).

Se procedió a calcular el índice horizontal con la ecuación 12 y con este valor se determinó el distanciamiento entre barreras por medio de la ecuación 13 y por último se obtuvo el número de barreras a realizar con la ecuación 14.

$$IH = \frac{IV}{P} * 100 \quad (12)$$

$$D = \sqrt{IV^2 + IH^2} \quad (13)$$

$$N = \frac{L}{D} \quad (14)$$

Cultivos a contorno

Por medio del modelo de elevación digital de trazaron las curvas de nivel, con el distanciamiento entre cultivo se generó un mapa de recomendación de siembra.

Árboles para sombra y amarre del suelo

Se consultó con el dueño de la finca que especie de árbol es de su preferencia para sombra dentro del cafetal a partir de esto se recomienda hacer barrera de árboles forestales seleccionados cada 12 a 15 metros. Más o menos entre 40 y hasta 70 árboles forestales por hectárea.

Terrazas

Se diseñó la estructura para terrazas tipo banco, donde se debe cuantificar una serie de variables interrelacionadas entre sí, como el intervalo vertical entre terrazas (IV), inclinación del talud (I), Altura de talud (At), ancho del talud (tA), ancho de terraza (TA) que tendrán las terrazas en función de la pendiente del terreno, el ancho de banco deseado, tomando en consideración que las terrazas fueran construidas a mano o con maquinaria. Las variables de conducción de agua determinan la cantidad de agua que captara cada banco o capacidad de los bancos, mientras que el desnivel junto con el ancho y profundidad de la conducción de la corriente de agua, establecen el caudal y velocidad de conducción que ellas tendrán hacia los caminos de agua. La capacidad de los bancos fue calculada a través de las siguientes ecuaciones:

$$SP = TA * LT \quad (15)$$

$$Cb = \left(\frac{P * E}{3600} \right) * SP \quad (16)$$

Donde:

SP: Superficie protegida por cada terraza (m²).

TA: Ancho terraza (m).

LT: Largo de la terraza (m).

Cb: Capacidad de los bancos (m³/s).

P: Intensidad de precipitación (mm/h).

E: coeficiente de escorrentía(m).

Luego se concluye su diseño determinando la sección transversal, el volumen de tierra por terraza y la superficie cultivable, lo cual se observa en las ecuaciones 17, 18 y 19.

$$St = \frac{Ab * At}{8} \quad (17)$$

$$Vt = St * LT \quad (18)$$

$$Sc = \frac{LT * Ab}{10000} \quad (19)$$

Donde:

St: Sección transversal (m²).

Ab: Ancho del banco (m).

At: Altura talud (m).

Vt: volumen de tierra por terraza (m³).

LT: Largo terraza.

Sc: Superficie cultivable (%de una hectárea).

Resultados

Erodabilidad

Con las siguientes características de suelo se aplicó la fórmula expuesta para Erodabilidad en metodología: MO [%] 1,5700 Estructura s: 2,0000, Conductividad [cm/h]: 34,1200 Conductividad [in/h]: 13,4320 Permeabilidad p: 1,0000 Limos + amf: 52,0000 Suma arenas: 10,0000. De donde se obtuvo un valor de: 0,169 ton*acre*h/100*acre*ft*tonf*in o 0,022 ton*ha*h/ha*MJ*mm. Este dato en teoría para suelo franco arcilloso corresponde de 0,28 ton*acre*h/100*acre*ft*tonf*in se puede observar que es un valor muy próximo, por lo cual se acepta.

Erosividad

Se determinó que la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio es la de Copey de Dota de donde se toma el valor de erosividad que corresponde a: 19,573 Ton*ha*h/ha*MJ*mm. Dato tomado del documento de “potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica” [9].

Cobertura

Se seleccionó un cultivo de café con cobertura al cual le corresponde un valor C de: 0,3 [10].

Factor LS

Se obtuvo un valor de 13,88 LS donde el factor promedio L corresponde a 3,47 y el factor S promedio de 3,97

Práctica de conservación

Se seleccionó el valor de 0,9, el cual corresponde a la práctica de conservación de cultivo a contorno para un terreno con una pendiente aproximada de 25% o más.

Ecuación “RUSLE”

Se obtuvo según la situación actual presente en la zona una pérdida de suelo de: 1,63 Ton*h/ Ha*año, este valor multiplicado por el área de 12,60 ha se estima una pérdida promedio de: 20,54 Ton*h/año. Valores que evidencian claramente los problemas presentes en el terreno. De hecho, según [11] estima que entre 20 y 50 Ton*h/año corresponde clasificación de riesgo de erosión muy alto.

La condición hidrológica antecedente, el grupo de suelos y el cálculo del número de curva, se muestran en el cuadro 1:

Cuadro 1. Condiciones hidrológicas presentes en el terreno en estudio.

Condición Hidrológica	Buena
Grupo de suelos	D
Número de curva	86

A partir del cálculo de la infiltración y la escorrentía potencial se obtuvo una infiltración potencial de 4,1349 cm y una escorrentía potencial de 47,9007 cm.

Propuesta de diseño 1

Zanjas de infiltración trampa

Se utilizaron los siguientes parámetros de diseño:

S (%): 31,1034, S [m/m]: 0,3110, Escorrentía [m]: 0,4790, Angulo (Rad): 0,3015

a [m]: 15,0000 y bc [m²]: 6,8609

En la figura 1 se detalla la distribución de las zanjas de infiltración, donde se observa que la distancia entre estas es de 14 m en la horizontal y 15 m en la vertical, con un área de 7 m²

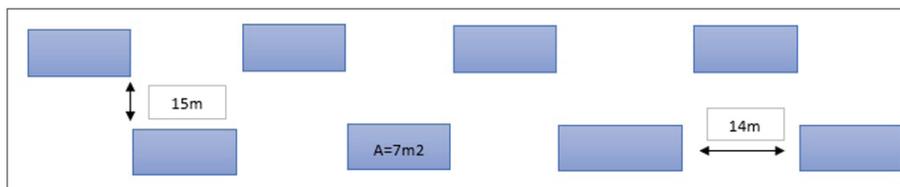


Figura 1. Zanjas de infiltración tipo trampa.

Barreras vivas

Se hace una división del terreno en tres secciones A1, A2 y A3, para analizar más a detalle la topografía del terreno y obtener resultados más ajustados. En la figura 2 se observa un mapa con esta división realizada.

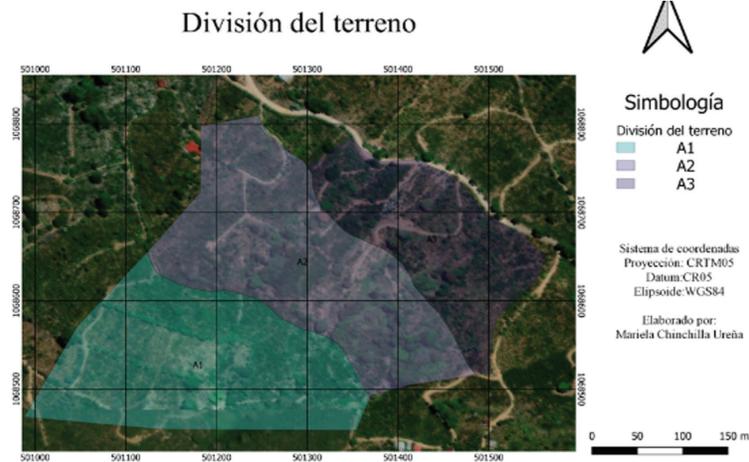


Figura 2. División del área de estudio en relación con la topografía.

En el cuadro 2 se toma en consideración distintos parámetros para determinar el número de barreras vivas que se deben implementar por división.

Cuadro 2. Parámetros de diseño de barreras vivas en las tres divisiones del terreno.

Zona	A1	A2	A3
Longitud del terreno [m]:	329,3420	376,0700	310,9560
S (%)	31,1000	28,7100	23,1800
IV [m]:	126,4400	126,4400	126,4400
IH [m]:	406,5000	440,3300	545,5100
D [m]:	425,7100	458,1200	559,9800
N Barreras:	1,0000	1,0000	1,0000

Como resultado se determinó un total de una barrera viva por zona para un total de tres en todo el terreno, se decidió utilizar zacate limón como barrera viva debido a que este presenta características que ayudan a reducir la velocidad del agua por cortar la ladera en pendientes más cortas, sirviendo además como filtro de los sedimentos que van en el agua de escurrimiento, debido a que tiene un macollamiento fuerte formando rápidamente una barrera densa, además [12] lo recomiendan para el control de la erosión y porque son los de mayor efectividad.

Cultivos a contorno

La siembra de cultivos a contorno consistió en la preparación de las hileras del cultivo en contra de la pendiente siguiendo las curvas a nivel, por lo que se debe trazar las curvas de nivel cada dos metros y realizar la siembra con un distanciamiento de un metro entre plantas.

Árboles de sombra y amarre del suelo

Se seleccionó el Poró (*Erythrina poeppigiana*) como árbol de sombra y amarre del suelo debido a que corresponde el árbol de preferencia del dueño del terreno y, también que corresponde a una de las especies de árboles recomendadas según la teoría, siguiendo las recomendaciones de teoría se colocan cada 15 metro aproximadamente 50 árboles por hectárea.

Propuesta de diseño 2

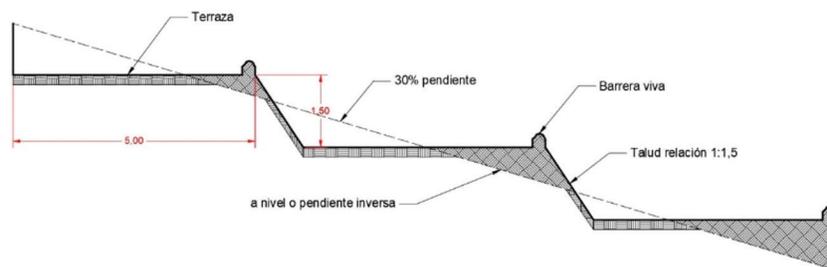
Terrazas

Se diseñó la propuesta de terrazas ya sea construidas manualmente o con maquinaria, en el cuadro 3, se indican las dimensiones de las terrazas:

Cuadro 3. Diseño de terrazas construidas manualmente y construidas con maquinaria.

Dimensiones de terrazas	Terrazas de banco construidas manualmente	Terrazas de banco construidas con maquinaria
Ancho (m)	4,0000	4,0000
Pendiente %	30,0000	30,0000
IV	1,5500	1,7000
IB	0,0000	0,0000
At	1,5500	1,7100
Ta	1,1600	1,7100
TA	5,1600	5,7100
LT	100,0000	100,0000
P(mm/h)	72,0000	72,0000
SP (m2)	516,0000	571,0000
E	0,8000	0,8000
Cb (m3/s)	8,2560	9,1360
St (m2)	0,7750	0,8550
Vt (m3)	77,5000	85,5000
Sc (%)	0,0400	0,0400

En la siguiente figura se ejemplifica las dimensiones de las terrazas construidas a mano:



Terrazas Banco construidas a mano

Figura 3. Terrazas construidas a mano.

Aplicación de la ecuación “RUSLE” para las propuestas de diseño

Se calculó nuevamente la pérdida de suelo, pero con la implementación de las propuestas de diseño para cuantificar la pérdida de suelo con los diseños instalados.

Con la implementación de la propuesta 1 se modifica el factor LS, obteniendo un promedio de 3,09 como factor LS, este se disminuye considerablemente, ya que se modifica la longitud a 15 metros. Para la propuesta 2 al implementar terrazas en la zona en estudio se modifica el factor de práctica de conservación de cultivo a contorno a cultivo en terrazas pasando de un factor de 0,90 a uno de 0,18. Se obtiene una pérdida de suelo promedio en la zona de estudio de: 4,56

Ton*h/año para la propuesta 1 y 4,11 Ton*h/año para la propuesta 2. Estos resultados reflejan, que se disminuye considerablemente el riego de erosión, pasando de un riego muy elevado a un rango de 2 a 5 Ton*h/año, que [11] clasifica como bajo.

Discusión

Los resultados obtenidos de la ecuación universal de pérdida de suelo, evidencia que, con las condiciones actuales, se pierde una cantidad severa de suelo, por ende, la productividad va ir en declive y los costos de producción van a aumentar, dado que se debe de garantizar nutrientes a las plantas y esto será directamente proporcional a un incremento en el consumo de agroquímicos para el productor. Esto genera a nivel local una situación ambiental inminente, debido a que, el lavado de los agroquímicos va a llegar a los cuerpos de agua, así como gran cantidad de sedimentos que generaran problemas de represamiento y desborde de los causes, por otro lado, el desgaste de los suelos para la producción compromete la seguridad alimentaria. Otra gran evidencia es que la zona es propensa a deslizamiento, en el pasado ha sido víctima de deslizamientos, que han representado las pérdidas materiales e inclusive pérdidas humanas, estos riesgos responden al uso de suelo que se le da en las partes altas. El dato de pérdida de suelo obtenido está muy relacionado a la topografía de la zona, ya que, está presenta altas pendientes, y que es una zona en la que gran parte del año se presenta altas precipitaciones, condiciones que contribuyen a la erosión del suelo, además, la práctica de conservación viene a ser la respuesta para contrarrestar los daños, pero, la limitación de acciones por parte de los agricultores a cambiar sus prácticas agrícolas son la respuesta a que se presente un riesgo severo a la erosión. Esto se evidencia más claro al implementar las propuestas de diseño, ya que, en la primera propuesta se cambia el factor topográfico y en el segundo la práctica de conservación. En ambas propuestas estas modificaciones disminuyen significativamente la pérdida de suelo. En la primera propuesta de diseño, las zanjas de infiltración permiten reducir los problemas de erosión en el terreno al modificar el factor LS, disminuyendo la velocidad de escorrentía, tal como lo demuestran estudios anteriores. De este modo la longitud de cada zona será igual al distanciamiento que tendrán las zanjas de infiltración. Y las barreras vivas funcionarían como protección a las zanjas de infiltración modificando el factor C al aumentar la cobertura vegetal, ya que se decidió cultivar zacate limón para retener la escorrentía que las zanjas no logren infiltrar. Para complementar este sistema, se utilizarían árboles de amarre y sombra de suelo, que ayudarían a sostener el suelo por el incremento de cobertura vegetal y por las raíces de los árboles. En la segunda propuesta de diseño se modifica el valor de práctica de conservación, pasando de no tener ninguna a implementar el uso de terrazas, este cambio se vuelve representativo, debido a que se pasa de un valor de 0,90 a 0,18 lo que disminuye la pérdida de suelo a 4,11 Ton*h/año, que corresponde a un daño bajo, además que como en la primera propuesta, se complementa el sistema con barreras vivas y árboles para sombra y amarre de suelo.

Conclusiones y recomendaciones

En la zona de estudio se ha comprobado la presencia de cárcavas y un terreno con condiciones de topografía, clima y cobertura vegetal, que coadyuvan procesos de erosión altos, obteniéndose una pérdida de suelo promedio de 20,54 Ton*h/año.

Además, se evidencia la importancia de las obras de conservación de suelo, debido a que se determinó que reduce en gran proporción la pérdida de suelo promedio en ambas propuestas, pasando de una pérdida de 20,54 Ton*h/año a 4,56 Ton*h/año con la propuesta 1 y 4,11 Ton*h/año con la propuesta 2. Se recomienda iniciar con el proceso de restauración de cárcava lo antes posible, para evitar que esta siga creciendo, también una vez que la

propuesta estructural este instala se recomienda realizar un estudio de suelo para verificar si las prácticas de conservación están cumpliendo con su función adecuadamente y contribuyen a las características del suelo.

Referencias

- [1] H. Fang, "Impacts of rainfall and soil conservation measures on soil, SOC, and TN losses on slopes in the black soil region, northeastern China," *Ecol. Indic.*, vol. 129, p. 108016, 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108016.
- [2] FAO, "Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe," 2015. [http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/516589/#:~:text=%22El 10%25 de Costa Rica,de la Desertificación de Tierras.](http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/516589/#:~:text=%22El%20de%20Costa%20Rica,de%20la%20Desertificaci%C3%B3n%20de%20Tierras.)
- [3] P. Rivera Ortiz, J. E. Rivera Larraga, E. Andrade Limas, F. de la Garza Requena, B. Castro Meza, and F. Belmonte Serrato, "Gully erosion measurement with satellite images.," *Medicion la Eros. en carcavas por medio imagenes satelite.*, vol. 32, no. 1, pp. 13–21, 2014, [Online]. Available: <http://portal.chapingo.mx/terra/index.php?module=resumenes&id=321013>.
- [4] W. Halecki, E. Kruk, and M. Ryczek, "Loss of topsoil and soil erosion by water in agricultural areas: A multi-criteria approach for various land use scenarios in the Western Carpathians using a SWAT model," *Land use policy*, vol. 73, no. October 2017, pp. 363–372, 2018, doi: 10.1016/j.landusepol.2018.01.041.
- [5] I. Asensio, M. Ramón, G. Blanquer, and J. Manuel, "La ecuacion universal de perdida de suelo (USLE)," *Univ. Politec. Val.*, vol. 1, no. 1, p. 10, 2012, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/16849>.
- [6] B. Grum *et al.*, "Catena water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM)," *Catena*, vol. 159, no. September 2016, pp. 20–34, 2017, doi: 10.1016/j.catena.2017.07.018.
- [7] ICAFE, "Tarrazú," 2015. <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/regiones-cafetalaras/tarrazu/>.
- [8] G. Almoza, Yeleine; Schiettecatte, Wouter; Medina, Hanoi; Alonso, "El uso de datos pluviométricos para la determinación del factor erosividad de las precipitaciones en el modelo RUSLE," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 17, no. 1, pp. 38–43, 2008, [Online]. Available: http://www.lamolina.edu.pe/zonasaridas/za11/pdfs/ZA11_00_art11.pdf.
- [9] W.-G. Vahrson, "El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica," *Agron. Costarric.*, vol. 14, no. 1, pp. 15–24, 1990, [Online]. Available: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v14n01_015.pdf.
- [10] E. Lianes, M. Marchamalo, and M. Roldán, "Evaluación del Factor C de la Rusle para el Manejo de Coberturas Vegetales en el Control de la Erisón en la Cuenca del Río Birris, Costa Rica.," *Agron. Costarric.*, vol. 33, no. 2, pp. 217–235, 2009, [Online]. Available: www.mag.go.cr/rev_agr/v33n02_217.pdf.
- [11] E. Gürtekin and O. Gökçe, "Estimation of erosion risk of Harebakayış sub-watershed, Elazığ, Turkey, using GIS based RUSLE model," *Environ. Challenges*, vol. 5, no. June, p. 100315, 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100315.
- [12] FAO - MAG, "Las Barreras Vivas Y Su Aplicación," 1999, [Online]. Available: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_003.pdf.

Modelación hidrodinámica de un tramo del río Purires a la altura del nuevo hospital, ante un posible escenario de cambio climático

Hydrodynamic modeling of a section of the river Purires at the height of the new hospital, in a possible climate change scenario

David Borge-Leandro¹, Pablo Fernández-Campos²

Fecha de recepción: 18 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 21 de febrero, 2023

Borge-Leandro, D; Fernández-Campos, P. Modelación hidrodinámica de un tramo del río Purires a la altura del nuevo hospital, ante un posible escenario de cambio climático. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 137-147.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6423>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Fidélitas de Costa Rica. Costa Rica. Correos electrónicos: davidbx@estudiantec.cr, dborge80034@ufide.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>
- 2 Universidad Fidélitas. Costa Rica.
Correo electrónico: pfernandez30857@ufide.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1605-2940>

Palabras clave

Morfometría; cuenca; hidrogramas; inundaciones; sistemas de información geográfica; Iber.

Resumen

En el cantón de El Guarco se ubicará el nuevo hospital de la provincia de Cartago, con un área estimada de construcción de 9 hectáreas, en un lote próximo a la confluencia de los ríos Purires y Coris. Históricamente en la zona se han presentado problemáticas relacionadas a desbordamientos de ríos e inundaciones. Los parámetros morfométricos determinados para la cuenca del río Purires señalan que la cuenca es propensa a la generación de inundaciones en la cuenca baja y la acumulación de sedimentos, esto aunado a altas pendientes que disminuyen su grado de inclinación según se aproximan al punto de estudio. Para la realización del proyecto del cual se deriva este artículo, se implementó el uso de una aeronave no tripulada y una antena RTK, esto para precisar la altimetría del área de interés, esta actividad resulta en un modelo digital de elevaciones de 3,7 cm/píxel, principal insumo para el modelado hidrodinámico. Se evalúa el comportamiento hidrodinámico de un tramo de 1,5km del río Purires, en Iber 2.4.3, del cual se obtiene la máxima extensión espacial, su calado y velocidad del flujo, así como su tiempo de permanencia, esto para un posible escenario de Cambio Climático. Se obtienen resultados tanto en el área donde se edificará el hospital, las llanuras de inundación próximas al tramo levantado del río, así como dos puentes, el puente 6 de la ruta nacional 2, que comunica el área metropolitana con la zona sur del país, y también un puente cantonal que comunica con el pueblo de Barrancas.

Keywords

Morphometry; watershed; hydrograms; floods; geographic information systems; Iber.

Abstract

The new hospital for the province of Cartago will be in the canton of El Guarco, with an estimated construction area of 9 hectares, on an area near the confluence of the Purires and Coris rivers. Historically in the area there have been problems related to overflowing rivers and floods. The morphometric parameters determined for the Purires river basin indicate that the basin is prone to flooding in the lower basin and the accumulation of sediments, this coupled with high slopes that decrease their degree of inclination as they approach the study point. For the realization of the project from which this article is derived, the use of an unmanned aerial vehicle and an RTK antenna was implemented, this to specify the altimetry of the area of interest, this activity results in a digital model of elevations with a resolution of 3.7 cm /pixel, main input for hydrodynamic modeling. The hydrodynamic behavior of a 1.5km section of the Purires river is evaluated, in Iber 2.4.3, from which the maximum spatial extension, its height of water and flow speed, as well as its residence time, are obtained, this for a possible Climate Change scenario. Results are obtained both in the area where the hospital will be built, the flood plains near the raised section of the river, as well as two bridges, bridge 6 of National Route 2, which connects the metropolitan area with the southern part of the country, and a cantonal bridge that communicates with the town of Barrancas.

Introducción

En el sitio de estudio se edificará el nuevo hospital de la provincia de Cartago, misma zona que históricamente ha presentado problemas relacionados a desbordamiento de ríos [1] [2]. Debido a esto se busca modelar hidrodinámicamente un tramo del río Purires a la altura del futuro hospital de Cartago como precaución ante posibles inundaciones, esto para un posible escenario de Cambio Climático. Estrictamente se evalúa las posibles manchas de inundación, tanto dentro como fuera del lote del hospital, así también, su calado, velocidad de flujo y tiempo de permanencia, pero además, se incluyen 2 puentes.

Los parámetros morfológicos de la cuenca del río Purires se desarrollan en QGIS, utilizando a manera de insumo el conjunto de archivos *shapefile* y *ráster* disponibles en la carpeta del Atlas Digital de Costa Rica 2014 [3].

Un informe realizado por la escuela de Ingeniería de Biosistemas de la UCR [4], utiliza la siguiente sucesión de parámetros para describir la morfología de una cuenca.

- Delimitación del área de estudio
- Parámetros de forma
 - * Factor de forma
 - * Índice de compacidad
- Red hidrográfica
 - * Longitud del cauce
 - * Pendiente media del río
 - * Densidad de drenajes
- Parámetros de relieve
 - * Curva hipsométrica

Se genera un hidrograma denominado, *T50-D30-CCC*, bajo la metodología del hidrograma unitario (HU) sintético de forma triangular [5] y aplicándole una forma de típica de hidrograma según el Hidrograma adimensional del SCS [6]. Se toma la fórmula propuesta por Kirpich (ecuación 1), como estimado al tiempo de concentración de la cuenca [7], y la intensidad bajo la fórmula de Vahrson de 1992 (ecuación 2), para la provincia de Cartago [8].

Para este modelo se considera una lluvia con una duración de 30 minutos, ya que se busca generar un escenario con una alta intensidad, una baja duración y que cubra un área pequeña, como lo es la cuenca del río Purires.

Se considera un aumento del 18% en la intensidad, correspondiente al posible escenario de Cambio Climático (CCC), Se hace uso de un valor más conservador que el mencionado por Myhre y otros [9].

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1)$$

$$I_{max} = 156.892 - 28.4612 * \ln(D) + (42.2027 - 8.0731 * \ln(D)) * \ln(T) \quad (2)$$

Donde:

L = Longitud del cauce (m)

S = Pendiente del cauce (m/m)

D = Duración del evento (min)

T = Periodo de retorno del evento (años)

Materiales y métodos

Este artículo parte de una investigación de tipo aplicada, ya que se hace uso del conocimiento existente generado por otros investigadores, para evaluar el potencial riesgo por inundaciones en el sitio de estudio, ante un posible escenario de Cambio Climático.

El sitio de estudio se ubica en la provincia de Cartago, en el cantón de El Guarco. Específicamente en las coordenadas 503290.45, 1086943,00, en la proyección CRTM-05.

Se realiza un levantamiento fotogramétrico por medio de una aeronave no tripulada de ala rotatoria, modelo *phantom 4v2*, y se precisa la altimetría con una antena RTK.

Se cubre un área de 60 hectáreas, levantando 1,5 km del río Purires, partiendo de la confluencia de los ríos Purires y Coris, además se incluyen dos puentes, un puente cantonal que comunica a Barrancas, y el puente nacional 6 de la ruta 2.

Los programas informáticos utilizados son: QGIS 3.10.14, Pix4Dmapper e Iber 2.4.3.

Resultados

Morfología

La cuenca del río Purires (ver figura 1), es una cuenca pequeña (55.40 km²), ensanchada y oblonga, su elevación máxima es de 2169 msnm, y su elevación mínima es de 1379 msnm.

Cuenta con una red fluvial bien definida con un patrón de drenaje dendrítico y con dos ríos principales: Purires y Coris.

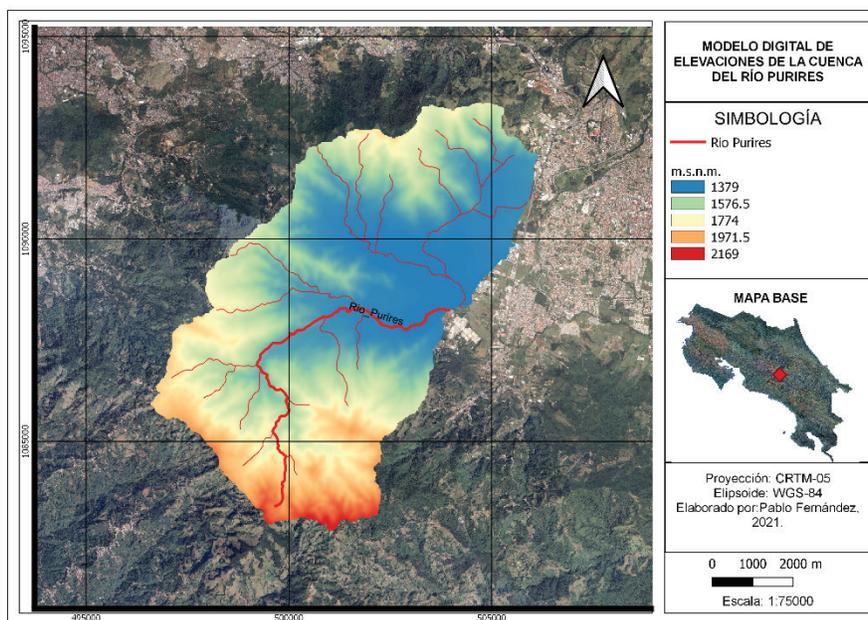


Figura 1. Modelo digital de elevaciones de la cuenca del río Purires.

Las pendientes de la cuenca varían entre 0% y 50%, mientras que la pendiente media del río es de 6.38%. Sin embargo, al descomponer el perfil longitudinal (ver figura 2), en dos segmentos, se tiene una pendiente superior al 9.2% en los primeros 6000 metros, y una menor al 1.7 % en los metros restantes. Lo que favorece el incremento en las velocidades del flujo hacia la cuenca baja, y que a su vez puede resultar en un arrastre de sedimentos, reduciendo la capacidad hidráulica del río.

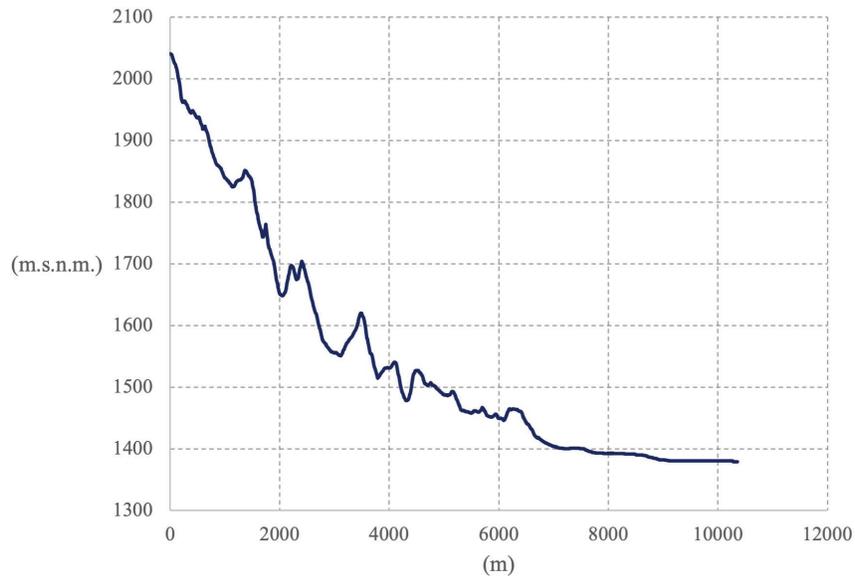


Figura 2. Perfil longitudinal del río Purires.

La curva hipsométrica (ver figura 3), refleja una cuenca sedimentaria en fase de vejez, ya que el 64% del área se encuentra en la cota 1477 (10% de altura relativa), el 19% del área se encuentra en 1797 (50% de altura relativa) y el 1% en la cota 2097 (90% de altura relativa). Respecto a la frecuencia de altitudes, la altitud media es 1557 m.s.n.m. y la altura más frecuente es 1417 m.s.n.m.

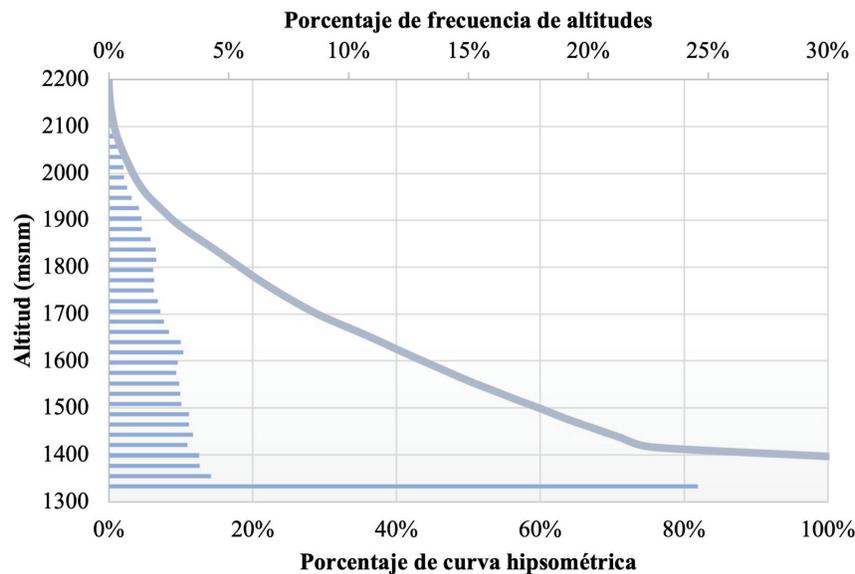


Figura 3. Curva hipsométrica del cuenca del río Purires.

En el cuadro 1 se muestra un resumen de los aspectos hidrológicos más relevantes sobre la cuenca del río Purires:

Cuadro 1. Cuadro resumen de las características morfológicas.

Parámetro	Simbología	Valor	Ud.
Perímetro de la cuenca	P	34,84	km
Área de la cuenca	A	55,40	km ²
Longitud del cauce principal	Lr	10387	m
Elevación máxima del río	HM	2041	msnm
Elevación mínima del río	Hm	1378	msnm
Longitud de todos los cauces	Ls	53,41	km
Parámetros de forma			
Factor de forma	F	0,63	km/km ²
Índice de compacidad	Ic	1,32	-
Red hidrográfica			
Pendiente media del río	lr	0,06	-
Densidad de drenajes	Dd	0,96	km/km ²

Hidrograma unitario sintético

Cuadro 2. Cálculos del HU T50-D30-CCC.

Cálculos		
<i>Pendiente</i>	0,0638	m/m
<i>Precipitación</i>	69,50	mm
<i>Tiempo de concentración (t_c)</i>	1,161	h
<i>Tiempo de retraso (T_r)</i>	0,696	h
<i>Tiempo pico (t_p)</i>	1,77	h
<i>Tiempo base (t_b)</i>	4,74	h
<i>Caudal punta (Q_p)</i>	451,55	m ³ /s
<i>Intensidad</i>	139,01	mm/h

En el cuadro 2 se muestran los resultados del hidrograma triangular unitario para el escenario T50-D30-CCC, y el cual hace de insumo para obtener el hidrograma adimensional del SCS (ver figura 4). En el cual se tiene evento de duración 4.74 h, con un caudal punta de 451.55 m³/s, en un tiempo pico de 1.77 h y una intensidad asociada de 139.01 mm/h.

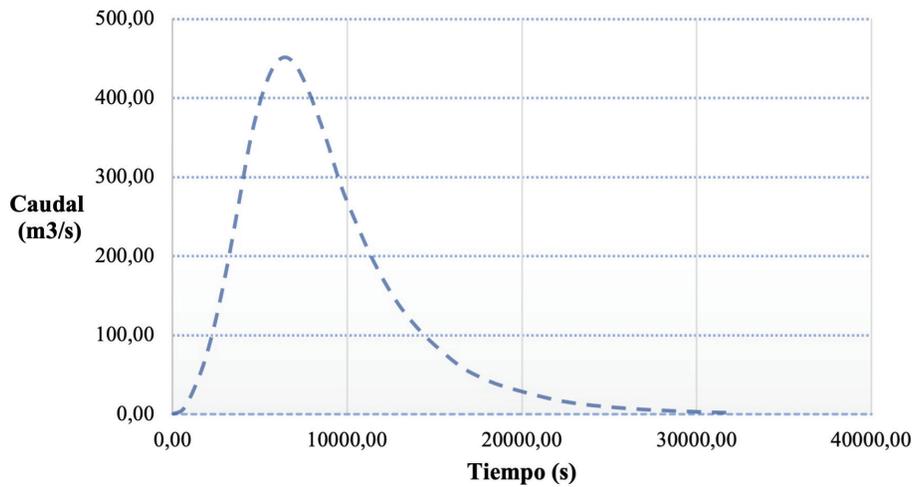


Figura 4. Hidrograma adimensional del SCS.

Modelo Digital de Elevaciones del área de estudio

Por medio de 7 vuelos, más de 1500 fotografías, y un geoprocesamiento en Pix4Dmapper, se obtiene un modelo digital de elevaciones con una precisión de 3.7 cm/píxel (ver figura 5), y una ortofoto de la condición de cobertura actual.

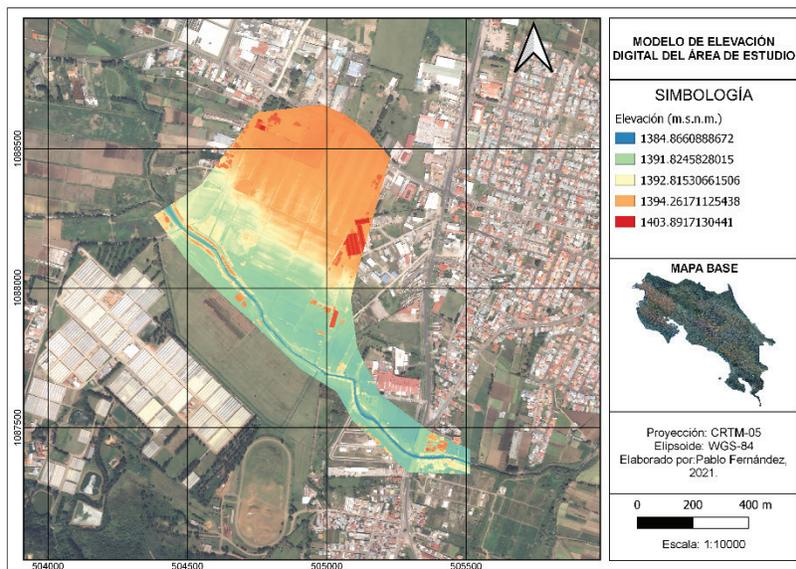


Figura 5. Modelo digital de elevaciones del área de estudio.

Manchas de inundación

Con el modelo digital de elevaciones, una clasificación de la rugosidad del suelo según su cobertura, el hidrograma T50-D30-CCC, y 2 mallas no estructuradas de 1 metro para el cauce del río y 2 metros para el área restante, se obtiene la máxima extensión espacial, su calado (ver Figura 6) y velocidad de flujo (ver figura 7), además del tiempo de permanencia.

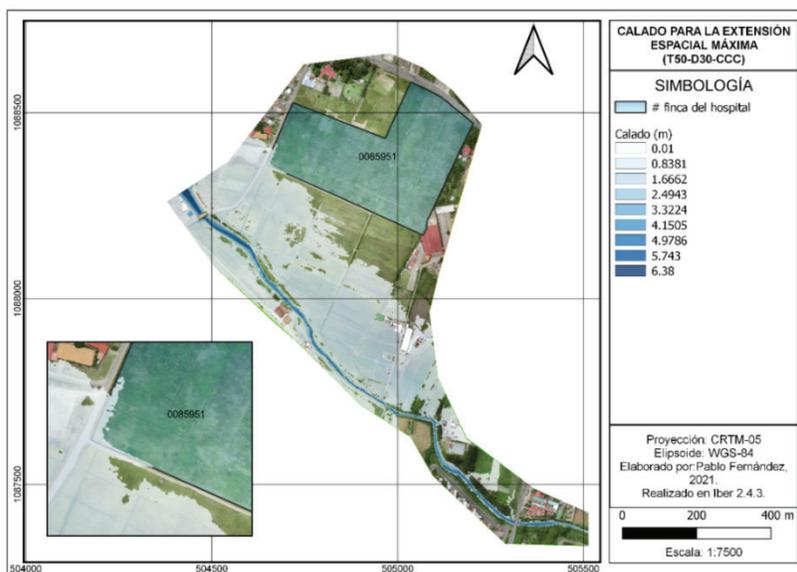


Figura 6. Calado para la extensión espacial máxima.

Fuera de los linderos del área del hospital (finca #0085951), se genera una extensión espacial máxima que cubre aproximadamente 19 ha del margen izquierdo del río, esto puede no representar la extensión espacial máxima total, sino la extensión máxima posible delimitada por el área levantada. Se genera un calado entre 0.01 y 2.46 m, velocidades de flujo que rondan los 0 y 3.13 m/s, con un tiempo de permanencia indefinido.

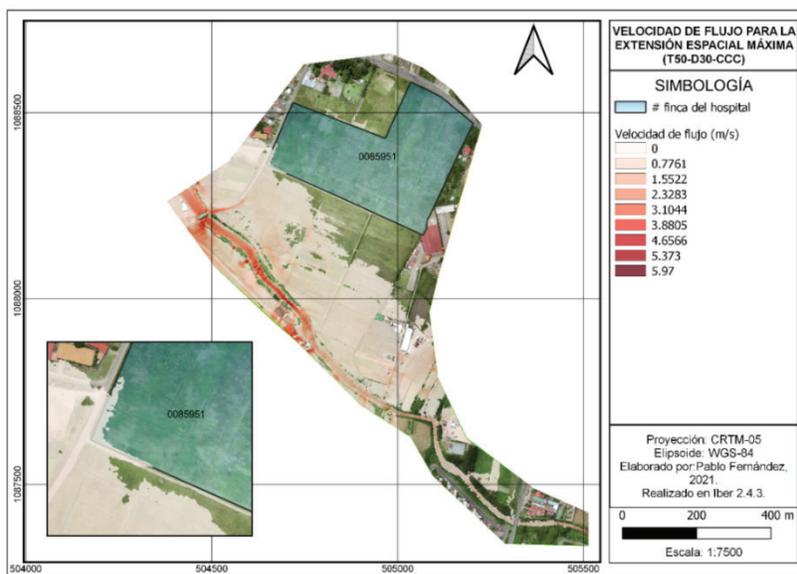


Figura 7. Velocidad del flujo para la extensión espacial máxima.

El flujo del agua alcanza a invadir la finca #0085951 entre los linderos sur y oeste (ver figura 8), cubriendo 791.0 m² correspondiente al 0.67% del área total del lote del hospital.

La altura del agua que invade este área ronda entre 0.1 y 68 centímetros, con velocidades de flujo asociadas entre los 0 y 9 cm/s.

El tiempo de permanencia del agua en el lote de interés es indefinido, ya que hay zonas que retienen el agua debido a la variación de altura, incluso al finalizar la simulación.

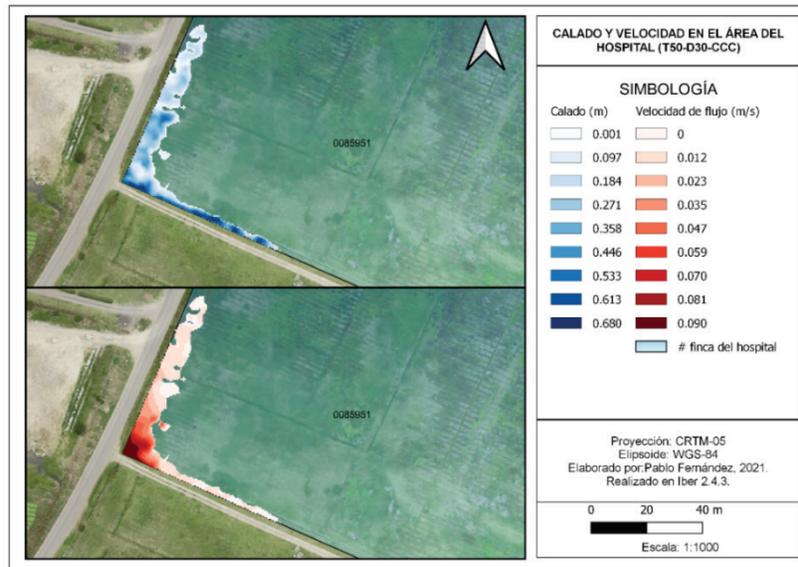


Figura 8. Calado y velocidad de flujo en el área del futuro hospital.

Puentes

Aguas arriba del puente cantonal (ver figura 9), se observa una acumulación de flujo que pudiera ser generada debido a la contracción por los bastiones del puente, alcanzando una altura de hasta 6.75 metros, donde la cota del agua alcanza incluso a superar la cota superior del tablero, por lo que ante este escenario la superestructura del puente pudiera resultar dañada.

Por su parte, la velocidad de flujo, aguas arriba es de 3 m/s y aguas abajo supera los 5 m/s, esto podría representar un potencial riesgo erosivo a los diques e incluso podría socavar las bases del puente.

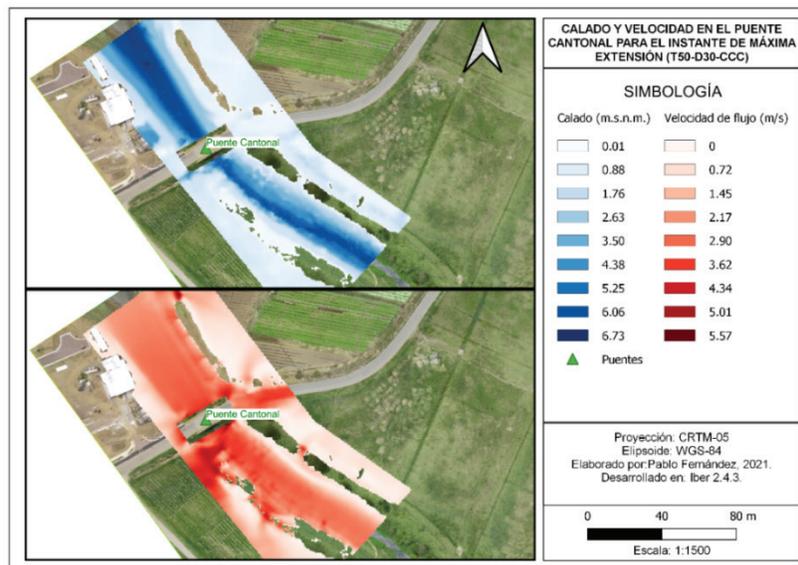


Figura 9. Calado y velocidad de flujo en el puente cantonal.

Respecto al puente nacional (ver figura 10), aguas arriba se alcanza un calado de hasta 5 metros, lo cual no alcanza la cota inferior del tablero, además se asocia con una velocidad de flujo en torno a los 0.75 m/s por lo que no se considera un potencial riesgo erosivo.

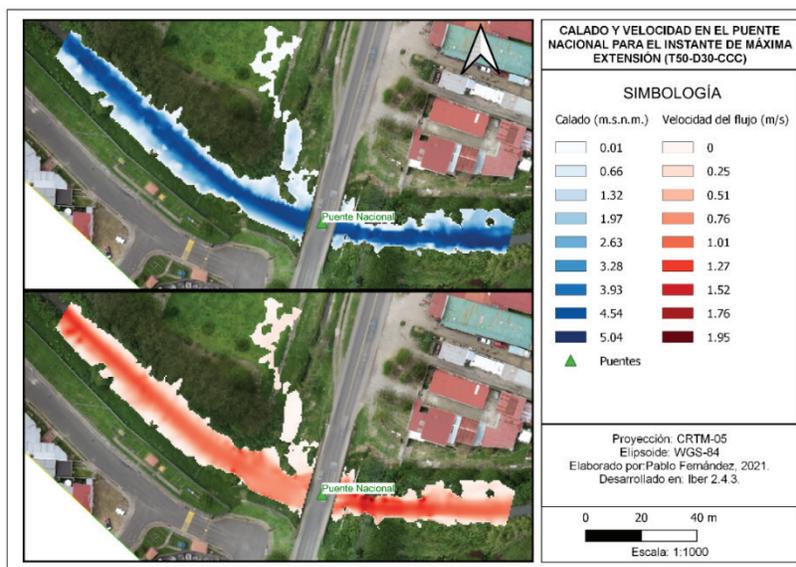


Figura 10. Calado y velocidad de flujo en el puente nacional.

Conclusiones

Las características morfológicas indican que la cuenca favorece la generación de inundaciones en la cuenca baja.

El modelado hidrodinámico evidencia un anegamiento en la finca #0085951, sin embargo por los resultados obtenidos, no supondrían un riesgo a alguna infraestructura, esto no significa que no debe tenerse en cuenta en el diseño de la infraestructura.

El levantamiento fotogramétrico resultó correcto y satisfactorio, ya que se logró levantar 60 hectáreas en un corto periodo de tiempo, además de precisar la altimetría del MDE.

El puente cantonal se encuentra en una posición de riesgo ante un evento como el evaluado, por su parte el puente nacional no presentaría riesgos.

Los programas informáticos utilizados son prácticos, ya que reducen el tiempo de ejecución de procesos, además de precisar los resultados.

Se recomienda aumentar el área levantada, incluyendo la confluencia de los ríos, además de 500 metros aguas arriba de estos, también se recomienda levantar el margen derecho del río, ya que se observan desbordamientos en este margen.

Se recomienda realizar un estudio de erosión y socavación en el tramo de río estudiado.

Se aconseja la implementación de SUDS en la futura infraestructura.

Referencias

- [1] CNE, «Amenazas de origen natural cantón de El Guarco,» 2019. [En línea]. Available: https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_ameanza/cartago/El%20Guarco%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf.

- [2] M. Cartin, «micostaricadeantano,» 6 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://micostaricadeantano.com/2021/02/06/ciudad-del-lodo-el-tejar-el-guarco-cartago-1801-1850/>.
- [3] E. Ortiz-Malavasi, «RepositorioTEC,» 06 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6749?show=full>.
- [4] Escuela de biosistemas de la Universidad de Costa Rica, «Informe estudio de zonas amenazas por inundaciones usando sensores remotos, Análisis hidrológico e hidráulico para mejorar la cuantificación y gestión del riesgo en la cuenca de Aguas Claras,» Universidad de Costa Rica.
- [5] SIECA, «Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la Infraestructura Vial en Centroamérica,» 2016, pp. 85-91.
- [6] M. Villón, «Hidrología,» Cartago, Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológica de Costa Rica, 2002, pp. 229-231.
- [7] SIECA, «Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la Infraestructura Vial en Centroamérica,» 2016, pp. 82-83.
- [8] M. Villón, «Hidrología,» Cartago, Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2002, p. 114.
- [9] Myhre, G; Alterskjær, K; Stjern, C.W.; Hodnebrog, Ø; Marelle, L; Samset, B.H.; Sillmann, J; Schaller, N; Fischer, E; Schulz, M; Stohl, A, «Scientific reports,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-52277-4#citeas>.

Evaluación de la salud ambiental del río Ocloro, utilizando una metodología mixta

Assessment of the Ocloro River's environmental health, using a mixed methodology

María Chaves-Villalobos¹, Jose Quirós-Vega², Stephanie Cordero-Cordero³, Jenny Villalobos-Sequeira⁴, Deivis Anchía-Leitón⁵, Alonso Loría-Barquero⁶, Daniela Luna-Salas⁷, Ana Fung-Méndez⁸, Mónica Paniagua-Pantoja⁹

Fecha de recepción: 21 de septiembre, 2022

Fecha de aprobación: 8 de enero, 2023

Chaves-Villalobos, M; Quirós-Vega, J; Cordero-Cordero, S; Villalobos-Sequeira, J; Anchía-Leitón, D; Loría-Barquero, A; Luna-Salas, D; Fung-Méndez, A; Paniagua-Pantoja, M. Evaluación de la salud ambiental del río ocloro, utilizando una metodología mixta. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 148-159.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6392>

- 1 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: maria.chaves.villalobos@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5632-4149>
- 2 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jose.quiros.vega@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2731-2691>
- 3 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: stephanie.cordero.cordero@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6283-8536>
- 4 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jenny.villalobos.sequeira@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-0186-6140>
- 5 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: deivis.anchia.leiton@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3606-6250>
- 6 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: alonso.loria.barquero@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4321-8048>
- 7 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: daniela.luna.salas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8830-7362>
- 8 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: ana.fung.mendez@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7025-4020>
- 9 Universidad Nacional Costa Rica. Correo electrónico: monica.paniagua.pantoja@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7633-1824>

Palabras clave

Contaminación; salud ambiental; metodología POSH; índice holandés; percepción social.

Resumen

La sostenibilidad de las zonas urbanas hoy en día enfrenta grandes desafíos, debido a los altos niveles de contaminación causados por la densidad poblacional. Por consiguiente, la disponibilidad del recurso hídrico se ve cada vez más comprometido, producto a la inapropiada gestión de residuos sólidos y líquidos, generados por diferentes actividades humanas. El río Ocloro es un claro ejemplo de esta problemática, el deterioro de su salud ambiental es una evidencia de ello. Para conocerla, se utilizó una metodología mixta, el primer método fue la caracterización de la calidad del agua mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, posteriormente, la determinación del índice holandés, obteniendo un total de 16 muestras clase 5 “contaminación muy severa” y 4 muestras clase 4 “contaminación severa”, del 2019 al 2021. En la segunda etapa se aplicó una encuesta de percepción entre un sector específico de la población de Barrio Luján, alcanzando información de 80 viviendas, donde 54 personas indicaron haber tenido afectación por la contaminación del río; asimismo, la mayoría calificó el nivel de contaminación en 8, donde 10 era el valor con mayor nivel de contaminación. Finalmente se utilizó el método POSH, el cual permitió identificar algunas de las principales fuentes puntuales de contaminación en las cercanías del río, determinando 27,1 % de contaminación elevada, 22,3 % de contaminación moderada y 50,6 % de contaminación reducida; este último le corresponde a la parte norte de la microcuenca en los barrios de San Pedro, Los Yoses y Francisco Peralta.

Keywords

Pollution; environmental health; POSH methodology; Dutch index; social perception.

Abstract

The sustainability of urban areas nowadays faces significant challenges, due to high levels of pollution caused by population density. Therefore, the availability of water resources appears to be becoming increasingly compromised, as a result of inappropriate management of the solid and liquid waste generated by different human activities. The Ocloro River is a clear example of this problem, as evidenced by the deterioration of its environmental health. A mixed methodology was used to know about it, the first method was to characterize water quality using physicochemical and microbiological parameters, later on, the determination of the Dutch index, giving a total of 16 samples of class 5 “extreme contamination” and 4 samples of class 4 “severe contamination”, from 2019 to 2021. In the second stage, a perception survey was conducted among a specific sector of the Barrio Luján population, approaching information from 80 homes, where 54 people indicated that the river pollution had affected them; additionally, the majority rated the level of pollution as 8, where 10 was the value with the highest level of pollution. Finally, the POSH method was used, which allowed the identification of some of the main point sources of pollution near the river, determining 27.1 % of high pollution, 22.3 % of moderate pollution, and 50.6 % of reduced pollution; this last one corresponds to the northern part of the river micro-basin in the communities of San Pedro, Los Yoses, and Francisco Peralta.

Introducción

El crecimiento urbano y el cambio climático traen nuevos desafíos en la sostenibilidad de comunidades, en especial aquellas que, por su cercanía a ríos urbanos enfrentan diversas afectaciones, producto al incremento de eventos climáticos extremos y del ingreso de residuos sólidos y líquidos que se traducen en contaminación. Lo anterior, tiene como causa la densidad poblacional en las zonas urbanas, aumentando la demanda del recurso hídrico, y a su vez la generación de aguas residuales que en su mayoría no son tratadas adecuadamente, comprometiendo la disponibilidad del recurso hídrico [1].

En Costa Rica, la Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales, señala que un 84 % de aguas residuales ordinarias y el 54,7 % de aguas residuales industriales, se vierten de manera directa en cuerpos de agua [2]. Aunado a esta problemática, el Ministerio de Salud, señala que, de las 4 000 ton de residuos sólidos generados diariamente en Costa Rica, 1 000 ton no reciben ningún tipo de tratamiento y son depositadas en vertederos a cielo abierto, calles, ríos, lotes baldíos y otros; provocando que parte de estos residuos sólidos, terminen en cuerpos de agua y sean trasladados a otras partes de la cuenca, especialmente en eventos con altos volúmenes de escorrentía [3].

Por lo tanto, los impactos ambientales producto de las actividades antropogénicas derivan consecuencias en toda el área de una cuenca hidrográfica, desde su parte alta los efectos se podrían extender a lo largo de la cuenca como, la muerte de la fauna, pérdida de hábitats, acumulación de residuos sólidos en las partes bajas, degradación de la calidad de agua superficial y otras consecuencias asociadas al mal manejo de los residuos líquidos y sólidos [4].

La evidencia de esta problemática ha sido reflejada en previos estudios en subcuencas y microcuencas de las 34 cuencas hidrográficas localizadas en el territorio nacional [5]. Por esa razón, surge la iniciativa de esta investigación con la finalidad de evaluar la salud ambiental de la microcuenca del río Ocloro, para generar herramientas útiles, que promuevan el aumento en la resiliencia de la comunidad, integrando metodologías cuantitativas y cualitativas; desde las ciencias exactas, las áreas que promueven la comprensión de la historia, la percepción de la población aledaña y las acciones para la recuperación de la microcuenca.

Materiales y métodos

Descripción del sitio de estudio

El río Ocloro, nace a una altitud de 1 225 m.s.n.m en el cantón de Curridabat de la provincia de San José, a lo largo de su recorrido fluye por otros cantones del Gran Área Metropolitana (GAM), como Montes de Oca y San José. Es tributario del río María Aguilar, el cual se une con el río Tiribi, río Torres y posteriormente al río Virilla, que vierten en la gran cuenca del río Grande de Tárcoles, desembocando en el Océano Pacífico. La microcuenca del río Ocloro posee una extensión territorial aproximada de 5,79 km², de la cual un 96,03 % es de uso urbano y tan solo un 3,97 % aproximadamente es uso de áreas verdes, recreativas, deportivas y cobertura forestal, tal como se muestra en la figura 1.

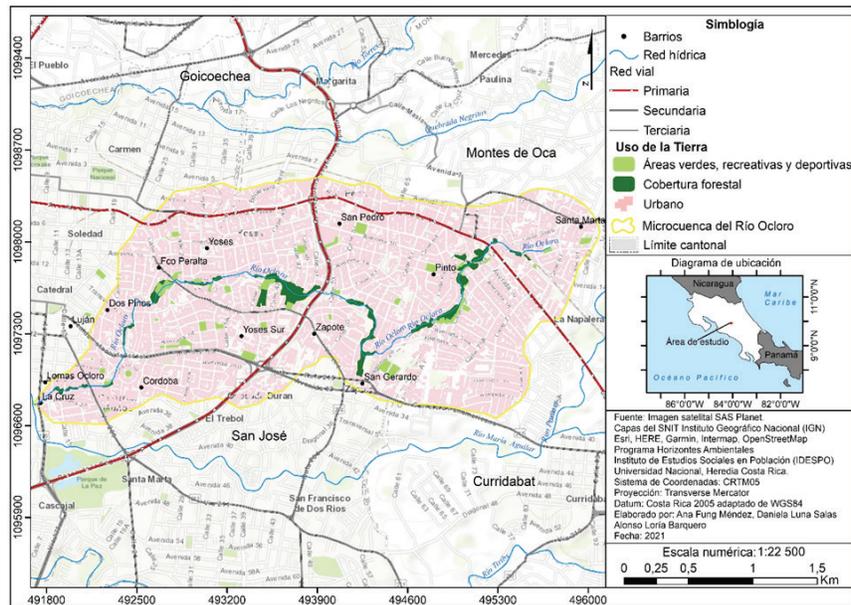


Figura 1. Uso de la tierra, microcuenca río Ocloro.

Adicionalmente, este río Ocloro cuenta con una longitud de 5,88 km. Sobre este cauce principal, de acuerdo a [6] desde el año 1989 se han realizado obras de entubamiento, alcanzando una longitud de 1,14 km para el año 2021 (ver figura 1). Lo anterior ha desencadenado inundaciones principalmente en las inmediaciones de Barrio Luján.

Metodología

El apartado metodológico de este estudio comprende tres etapas para la determinación de la salud ambiental del río Ocloro:

1 Etapa: Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua, determinación del Índice Holandés

En esta etapa se hizo un reconocimiento inicial de la trayectoria de la microcuenca, para determinar los puntos de muestreo más representativos, en la categorización de la clase de agua. Los muestreos se realizaron durante los años 2019-2021, con la particularidad de que el 2019 por razones presupuestarias sólo se tomó muestra en la parte baja de la microcuenca, mientras que, para el 2020 y el 2021 se pudo realizar un perfil completo de parte alta, media y baja, tres veces al año (estación seca, transición seca-lluviosa y lluviosa). La ubicación de los puntos de muestreo se encuentra en la figura 2.

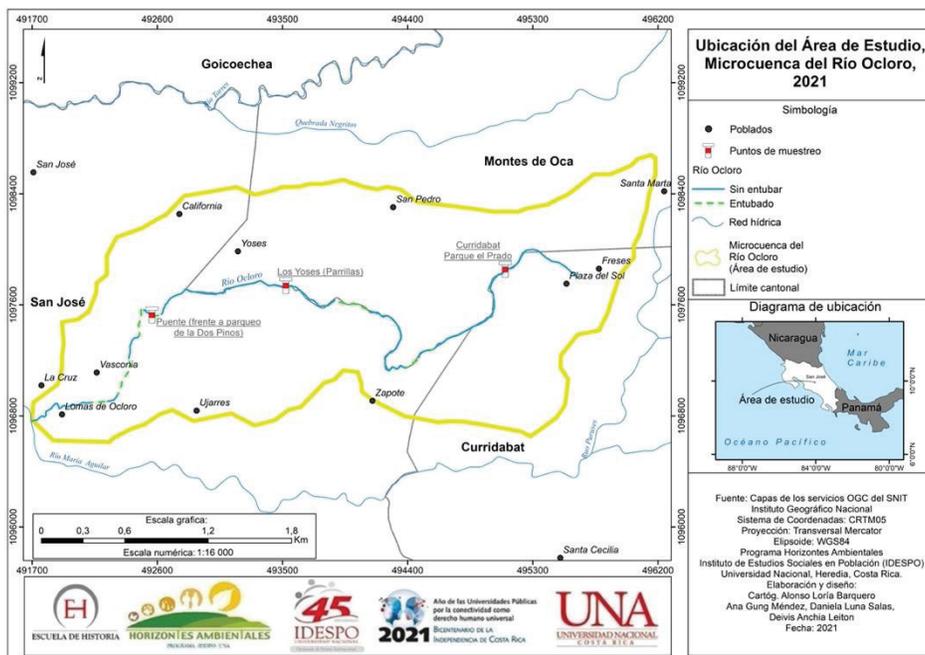


Figura 2. Ubicación del área de estudio y puntos de muestreo.

La clasificación de la calidad del agua en los puntos de muestreo se obtuvo aplicando el Índice Holandés, descrito en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (Decreto No. 33903-MINAE-S) [7]. En este reglamento se establecen los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para la clasificación de los cuerpos de agua superficiales en 5 categorías distintas, mediante el análisis de componentes principales, lo anterior se muestra en el cuadro 1. Las muestras se recolectaron y trasladaron a 4 °C a un laboratorio de ensayo acreditado bajo la ISO 17025:2017 garantizando la calidad de los resultados obtenidos.

Cuadro 1. Cuadro de asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.

Clase	Sumatoria de puntos	Código de color	Interpretación de calidad
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4 a 6	Verde	Contaminación incipiente
3	7 a 9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10 a 12	Anaranjado	Contaminación severa
5	13 a 15	Rojo	Contaminación muy severa

Elaboración propia con información del Decreto No. 33903-MINAE-S

La categoría se logró aplicando la sumatoria de puntos asociados a los valores reportados de Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l), Porcentaje de Saturación de Oxígeno (%) y Nitrógeno Amoniacal (mg/l).

II Etapa: Encuesta de percepción

En la segunda etapa se ejecutó una encuesta de percepción, con el objetivo de evaluar la situación actual de la salud ambiental del río Ocloro, según la opinión de la comunidad. Esta encuesta se aplicó en un sector de la población de Barrio Luján los días 13, 14, 20 y 21 de marzo del 2021. Para este se delimitó un radio de 75 metros de distancia a ambos lados del cauce del río Ocloro, considerando que este sector experimenta los impactos causados por las inundaciones.

El área de estudio se estratificó en cinco sectores denominados A, B, C, D y E, contabilizando un total de 200 viviendas, de estas 7 se encontraban desocupadas, 19 rechazaron la encuesta, 9 no se realizaron, por no cumplir criterios establecidos, 2 no lograron completar la información de la encuesta y en 83 viviendas no se logró contactar a ninguna persona informante.

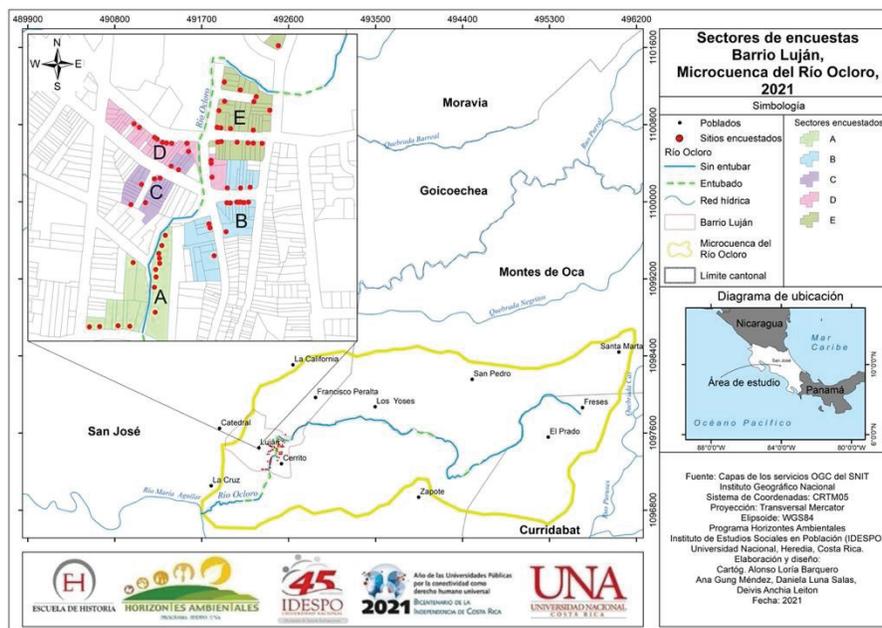


Figura 3. Sectores de Barrio Luján donde se aplicó la encuesta.

Finalmente, se logró obtener información de 80 viviendas, entrevistando a una persona informante clave de 18 años y más, residente habitual de la vivienda, con dos años o más de vivir en la comunidad y con conocimiento en los temas a abordar. Por lo tanto, los resultados de la encuesta responden únicamente a la percepción de las personas entrevistadas, por ende, no es posible generalizar los resultados al total de la población de Barrio Luján. La información fue procesada en el programa *SPSS Statistics* y los mapas de los resultados en el programa *ArcGis*.

III Etapa: Metodología POSH

Esta tercera etapa se realizó con el fin de identificar las fuentes de contaminación puntuales de la microcuenca del río Ocloro. Para lograr el proceso de recopilación, elaboración y manejo de datos se utilizó el método Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (POSH por sus siglas en inglés), que posee dos características estimables: el origen del contaminante (Pollutant Origin) y su sobrecarga hidráulica (Surcharge Hydraulically), lo que produce tres niveles cualitativos que generan una carga contaminante al subsuelo: reducido, moderado y elevado [8].

Además, se utilizó información secundaria como archivos Shapefiles del Sistema Nacional de Información Territorial SNIT. De igual manera, se usó como base una imagen satelital de SAS.Planet para realizar la fotointerpretación del uso del suelo, y las capas de Basemap de la aplicación de ArcGIS, en específico OpenStreetMap para la identificación de las fuentes puntuales. referente al método POSH.

Finalmente, para realizar la cartografía de fuentes puntuales, se elaboró un mapa base del uso de suelo (figura 1), seleccionando información sobre las actividades desarrolladas en el área de estudio, asignándoles su correspondiente clasificación de acuerdo a la carga contaminante.

Cabe destacar que, el reconocimiento del uso de la tierra y de las fuentes puntuales, se hizo mediante trabajo de gabinete, debido a la declaratoria de emergencia nacional sanitaria a causa de la pandemia de la COVID-19, lo que impidió validar en trabajo de campo las fuentes puntuales de contaminación detectadas.

Resultados y discusión

El compendio de resultados obtenidos en los muestreos ocurridos desde el 2019 al 2021 se muestra en el cuadro 2. En el caso de los parámetros fisicoquímicos correspondiente a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Amonio y Porcentaje de Saturación de Oxígeno, se puede observar en el cuadro 2 que son muy variantes entre sí, incluso en los meses correspondientes a las estaciones seca, transición y lluviosa.

Estos valores se utilizaron para calcular el Índice Holandés en los años del proyecto, obteniendo mayoritariamente (16 muestras de 20) clase 5 en los diferentes puntos de muestreo, la cual se asocia con la categoría de calidad “contaminación muy severa” y solo 4 se asocian a la clase 4 que sigue siendo una clase de río de “contaminación severa”.

Tal como muestran estos resultados, el río a pesar de presentar en el último año, una baja en los parámetros fisicoquímicos, sigue obteniendo una categoría que no permite su uso, prácticamente para ningún fin. Los muestreos donde alcanzó la clase 4, se realizaron en los meses de julio 2020, julio y noviembre de 2021. Inicialmente se consideró que la entrada de las lluvias en la transición podría haber causado algún efecto diluyente de los contaminantes, por lo que se procedió a consultar la base de datos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), para la estación Zapote (la más cercana al área de la microcuenca del Ocloro), en los meses de interés, obteniendo promedios de precipitación para el mes de abril del 2021 de 0,31 mm, para julio 2021 de 0,31 mm; por último a pesar de ser un mes en el que se tienen lluvias fuertes para noviembre 2021 el promedio estuvo aún más bajo, en 0,2 mm [9].

Como se puede observar, no se encontraron datos concluyentes, que pudieran relacionarse o explicar este fenómeno que ocurre en el mes de julio 2021, con respecto a la baja en los resultados fisicoquímicos. Por su parte, los resultados de coliformes fecales, obtenidos en cada uno de los tres puntos de muestreo en el río Ocloro para el año 2020 reflejan cifras muy altas, tomando como referencia los parámetros biológicos complementarios del Decreto 33903-MINAE-S [7], donde resultados mayores a 5 000 (NMP/100 ml) de coliformes fecales, se clasifican en el nivel mayor de contaminación (clase 5), este dato se comparó con lo descrito por [5] basado en normas internacionales, donde se señala que un río urbano saludable debe contener una concentración de no más de 1 000 (NMP/100 ml) de coliformes fecales. Cifras similares a las mostradas en el cuadro 2, fueron encontrados en estudios realizados en el río Ocloro [5], donde los valores reportados para época seca se encuentran entre $2,3 \times 10^6$ NMP/100 ml y $1,6 \times 10^6$ NMP/100 ml de coliformes fecales y para la época lluviosa cerca de 3 000 NMP/100 ml, demostrando una vez más que el río Ocloro tiene un estado de salud en deterioro.

Cuadro 2. Cuadro de asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.

Fecha	Punto	PARÁMETRO				
		DBO (mg/l)	Amonio ($\mu\text{g/l}$)	Porcentaje de saturación (%)	Clase del río	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)
28-mar-19	3	33,6 \pm 3,0	5 433 \pm 634	40,1 \pm 4,0	Clase 5	N/A
16-ago-19	3	31,5 \pm 2,8	6 374 \pm 208	42,0 \pm 4,2	Clase 5	2,3 x 10 ³
16-ene-20	1	43,3 \pm 5,5	13 822 \pm 442	9,70 \pm 0,97	Clase 5	2,4x10 ³
	2	153 \pm 20	28 158 \pm 2 137	2,00 \pm 0,20	Clase 5	2,4x10 ³
	3	33,3 \pm 4,2	12 368 \pm 423	38,2 \pm 3,8	Clase 5	2,4x10 ³
2-jul-20	1	18,3 \pm 1,6	5 993 \pm 159	77,8 \pm 7,8	Clase 4	2,3x10 ³
	2	16,3 \pm 1,5	8 551 \pm 174	24,3 \pm 2,4	Clase 5	2,3x10 ³
	3	14,1 \pm 1,3	7340 \pm 165	81,1 \pm 8,1	Clase 4	2,3x10 ³
27-nov-20	1	9,7 \pm 1,1	7 764 \pm 146	25,90 \pm 0,26	Clase 5	1,6x10 ³
	2	13,0 \pm 1,4	8 415 \pm 151	23,10 \pm 0,23	Clase 5	1,6x10 ³
	3	11,0 \pm 1,2	6 824 \pm 142	39,00 \pm 0,39	Clase 5	1,6x10 ³
26-abr-21	1	30,8 \pm 2,9	17 438 \pm 302	13,9 \pm 1,4	Clase 5	1600
	2	46,1 \pm 4,2	6 983 \pm 224	11,3 \pm 1,1	Clase 5	920
	3	13,1 \pm 1,4	5 138 \pm 107	35,4 \pm 3,5	Clase 5	1600
14-jul-21	1	19,0 \pm 1,9	6 706 \pm 71	20,8 \pm 2,1	Clase 4	4,5
	2	14,4 \pm 1,5	1 920 \pm 30	37,5 \pm 3,8	Clase 5	7,8
	3	15,5 \pm 1,6	1 224 \pm 27	57,3 \pm 5,7	Clase 5	11
15-nov-21	1	20,9 \pm 2,0	5 090 \pm 110	21,4 \pm 2,1	Clase 5	14
	2	15,5 \pm 1,6	2 722 \pm 51	40,6 \pm 4,1	Clase 5	13
	3	17,5 \pm 1,7	3 007 \pm 54	55,9 \pm 5,6	Clase 4	14

Todos los cuerpos de agua, tienen la capacidad de autodepurarse, es decir, de regenerarse; a pesar de esto, este río al igual que muchos otros, requiere de una intervención inmediata para su mejora; pues el ingreso de contaminación diario, no le permite llegar a los niveles de regeneración necesarios para mejorar su estado de salud. Como esfuerzo inicial, se han puesto en ejecución los compromisos establecidos en la Política Nacional de Saneamiento [2], desarrollando obras de construcción que permiten la conexión de las viviendas y comercios de la GAM a la red de alcantarillado sanitario, incluyendo el área de la microcuenca del Ocloro. Sin embargo, esto resuelve únicamente la problemática de residuos líquidos, pero una gran parte de la contaminación que el río Ocloro presenta, son residuos sólidos.

La solución no puede estar únicamente en manos de instituciones, las personas que residen en el área de la microcuenca, también tienen un grado de responsabilidad importante en el desarrollo de una nueva cultura ambiental.

Por lo antes expuesto, en la encuesta de percepción realizada en la comunidad de Barrio Luján, se consultó sobre diferentes temáticas que permitieron generar una línea base, sobre el nivel de sensibilidad que las personas tienen del estado actual del río. Se obtuvieron 80 cuestionarios aplicados a personas de Barrio Luján, a las que se les consultó si se sentían afectadas por la contaminación del río, donde 54 personas indicaron percibirse afectadas por la contaminación en su mayoría por los olores provenientes del cauce, mientras que las 26 personas restantes indicaron no percibir ninguna afectación, principalmente por la distancia que hay entre sus residencias y el río. Asimismo, 54 personas describieron la situación actual del río con la palabra “contaminado” y 19 personas utilizaron la palabra “oloroso”.

Sobre esta última palabra se les preguntó a todas las personas entrevistadas, si percibían un olor proveniente del río Ocloro, a lo que 53 personas indican percibirlo y lo describen como olor a “Cloaca” principalmente (23 personas) seguido de “un olor desagradable” (17 personas). Además, identifican que la intensidad del olor aumenta durante el transcurso de la mañana. Las personas entrevistadas identifican como principales responsables de esta contaminación a “las personas” con 46 menciones, como segundo responsable “los vecinos” con 36 menciones y por último “la Municipalidad de San José” con 34 menciones.

Respecto al grado de responsabilidad que tienen las personas que viven en Barrio Luján, se determinó que 47 personas no se consideran responsables de la situación actual del río, mientras que 31 personas sí se consideran responsables del estado actual del río. Como se observa, la mayoría de personas no sienten grado de responsabilidad en el estado del río, a pesar de que el 100 % de la población realiza actividades antrópicas que contribuyen directamente en la generación de residuos sólidos y líquidos. A pesar de que los resultados fisicoquímicos y microbiológicos clasifican al río en un estado de contaminación muy severa, 32 personas perciben una mejora en la situación del río en el periodo 2019-2020, sin embargo, los pobladores de Barrio Luján clasificaron según su percepción el nivel de contaminación (0 lo menos y 10 lo más contaminado), con un promedio de 8, teniendo un valor general altamente contaminado.

La comunidad de Barrio Luján cuenta con 23 registros de inundaciones desde 1967 hasta el 2020 [10]. Razón por la cual, se les consultó a las personas entrevistadas sobre ciertas situaciones experimentadas, posterior a un evento de inundación, donde 43 personas indicaron que ellas o algún familiar estuvieron en contacto con el agua desbordada del río, de las cuales 11 personas manifestaron haberse enfermado debido al contacto con el agua del río, reportando principalmente gripe, hongos, alergias, fiebre y problemas respiratorios.

Como se demuestra en las respuestas obtenidas por la población entrevistada, la salud humana se encuentra comprometida de igual manera, que la salud ambiental del río, pues es poco probable que, en un ambiente enfermo, se encuentren personas saludables.

Por su parte, dentro de los resultados obtenidos con el método POSH, se identificaron fuentes puntuales de vulnerabilidad moderada y elevada, a lo largo y ancho de la microcuenca (ver figura 4).

Se identificaron veinte fuentes puntuales, de las cuales el 27,1 % es de contaminación elevada, el 22,3 % es de contaminación moderada y el 50,6 % es de contaminación reducida.

La figura 4, categoriza tres niveles de contaminación: elevado se encuentran las industrias tipo 3 (talleres mecánicos, centros comerciales, bares, ebanisterías y lubricentros); moderada las industrias tipo 2 (clínicas, bodegas y almacenes, gasolineras, fábricas, farmacias, venta de baterías y vehículos, cerrajerías y ferreterías), por último, reducido las industrias de tipo 1 (restaurantes, sodas, salones de belleza, veterinarias, panaderías, pulperías y cafeterías).

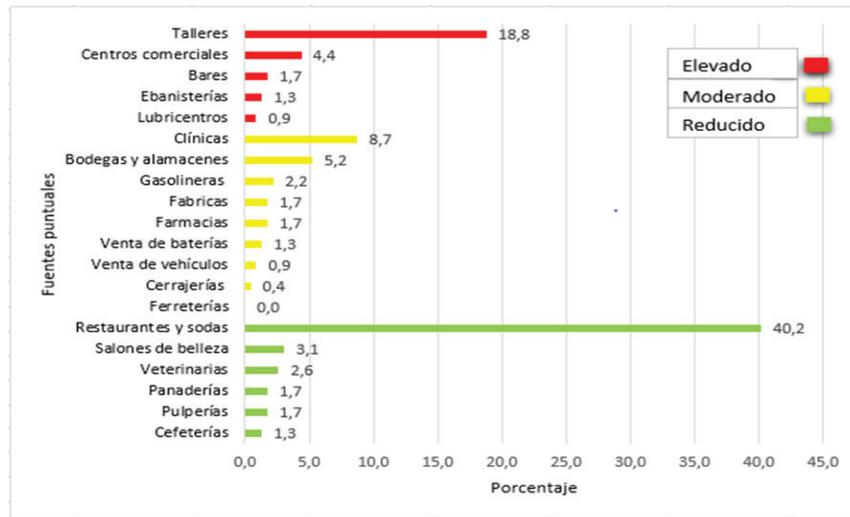


Figura 4. Cantidad de fuentes puntuales en porcentaje, microcuenca río Ocloro. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Las actividades socioeconómicas como talleres mecánicos, gasolineras, entre otras, frecuentemente generan fuentes de contaminación por la disposición de productos químicos y otros insumos utilizados por tipo de actividad. Asimismo, en algunos casos se utilizan hidrocarburos, los cuales, debido su baja solubilidad y alta densidad, podrían lixiviar hacia el agua subterránea, persistiendo por décadas o siglos.

En la figura 5 se muestra la distribución espacial y ubicación de las diferentes fuentes puntuales de contaminación, concentradas principalmente en la zona norte de la microcuenca en los barrios de San Pedro, los Yoses y Francisco Peralta. En su gran mayoría son de vulnerabilidad reducida.

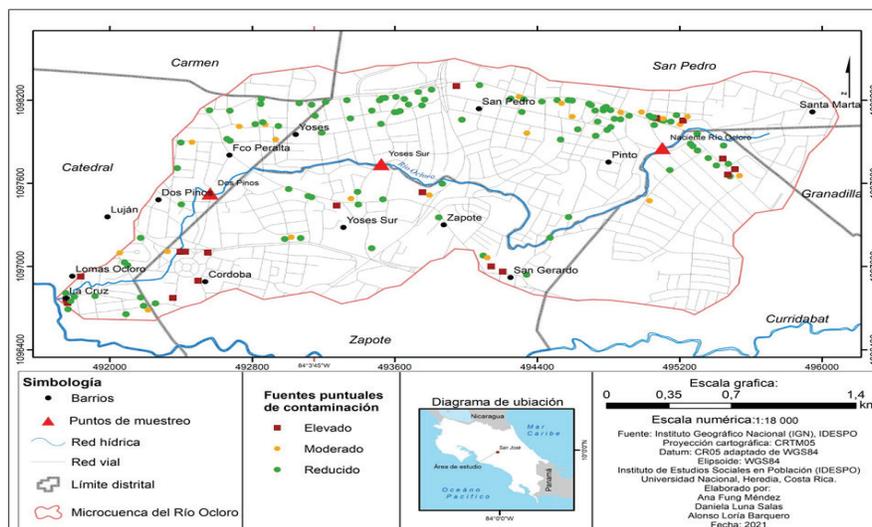


Figura 5. Clasificación de Contaminación Según Método POSH, microcuenca río Ocloro.

El método POSH considera, además, las fuentes lineales de contaminación, definidas como la accesibilidad de cualquier estructura física de comunicación sea carretera, ferrocarril, tendido eléctrico y conducción hidráulica, que se vincula a la presencia de nuevos asentamientos

humanos, generando impactos directos a la contaminación del río Ocloro. Sin embargo, en esta oportunidad, debido a los efectos que provocó la pandemia de la COVID-19, el levantamiento en campo de estas fuentes no fue posible.

Conclusiones y/o recomendaciones

Los resultados fisicoquímicos y microbiológicos, clasifican al río para el período 2019-2021 mayoritariamente (16 muestras de 20) en clase 5 “contaminación muy severa”, mientras que la clase 4 “contaminación severa” se obtuvo en las 4 muestras restantes, concluyendo un deterioro importante en el estado de salud ambiental del río Ocloro.

La variación de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos, obtenidos en el año 2021, no tienen relación con los parámetros metrológicos de lluvia, por lo que se descarta que la reducción de contaminación se deba a un efecto de dilución.

De las 80 personas entrevistadas, la mayoría (54 personas) indican percibirse afectadas por la contaminación en su mayoría por los olores provenientes del cauce. Al consultarles sobre el olor, las personas lo describen como olor a “Cloaca” principalmente (23 personas) seguido de “un olor desagradable” (17 personas), calificando en promedio el nivel de contaminación en 8, evidenciando la afectación en el deterioro en el estado de salud ambiental del río Ocloro.

Del total de personas entrevistadas, 47 personas indicaron no ser responsables de la situación actual del río, mientras que 31 personas sí se consideran responsables del estado actual del río, esta información es clave para la búsqueda de soluciones, pues se demuestra, que el primer paso es la sensibilización de la población que vive cerca de la microcuenca.

De las 43 personas que indican tener contacto con el agua del río Ocloro en momentos de inundación, 11 personas indicaron tener problemas respiratorios y daños en la piel posterior a este contacto.

La metodología POSH por su parte, logró identificar y analizar veinte fuentes puntuales, de las cuales el 27,1 % es de contaminación elevada, el 22,3 % es de contaminación moderada y el 50,6 % es de contaminación reducida, manteniendo un alto porcentaje en el caso de contaminación elevada, referente a talleres mecánicos, centros comerciales, bares, ebanisterías y lubricentros, actividades muy frecuentes en zonas urbanas.

Como recomendación es importante realizar estudios de la calidad del agua acarreada por las inundaciones, de manera que las personas puedan tener conocimiento de las condiciones especiales en caso de exposición o contacto con estas aguas contaminadas en viviendas, con el objetivo de tomar los cuidados necesarios y disminuir los riesgos en la salud de la población afectada.

Referencias

- [1] M. B. De Macedo, M. N. Gomes Júnior, T. R. Pereira de Oliveira, M. H. Giacomoni, M. Imani, K. Zhang, C. A. Ferreira do Lago y E. M. Mendiondo, «Low Impact Development practices in the context of United Nations Sustainable Development Goals: A new concept, lessons learned and challenges» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, nº <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1886889>, 2021.
- [2] Ministerio de energía y Ambiente, Ministerio de Salud, Instituto costarricense de acueductos y alcantarillados, «Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045» 2016. [En línea]. Available: <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf>. [Último acceso: 10 11 2021].
- [3] Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado, «Ríos Limpios: Estrategia Nacional para La Recuperación de Cuencas Urbanas 2020-2030» 2020. [En línea]. Available: <http://www.da.go.cr/estrategia-rios-limpios/>. [Último acceso: 04 10 2021].

- [4] A. L. Hernández Campos y M. L. Ulate González, «Determinación del impacto en la calidad del agua en la parte alta de la microcuenca del río Porrosatí, por vertido de aguas residuales, para la realización de planes y acciones de manejo de recursos hídricos» (Tesis licenciatura, Universidad Nacional), Heredia, 2016.
- [5] Ministerio de Ambiente y Energía, Fondo Mundial del Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Diagnóstico Multidimensional: Análisis del Estado de Situación del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/library/diagnostico-multidimensional-del-corredor-biologico-interurbano-.html>. [Último acceso: 09 10 2021].
- [6] S. Guevara-Viquez, « Informe Inundaciones en Barrio Luján,» (Informe de tesis doctoral Universidad Paris Este), Paris, 2019.
- [7] Ministerio de Energía y Ambiente, «Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales» (Decreto No 33903-MINAE-S), San José, 2007.
- [8] S. Foster, R. Hirata, D. Gomes, M. D'Elia y M. Paris , Julio 2003. [En línea]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/es/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>. [Último acceso: 03 01 2021].
- [9] Instituto Meteorológico Nacional , «Base de datos estación de Zapote» (Consulta institucional), San José, 2021.
- [10] Desinventar, «Base de datos Costa Rica» 2020. [En línea]. Available: <https://db.desinventar.org/DesInventar/results.jsp>. [Último acceso: 09 09 2021].
- [11] S. Foster, R. Hirata, D. Gomes, M. D'Elia y M. Paris, «Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.» Julio 2002. [En línea]. [Último acceso: 01 03 2021].

Estudio de altas densidades de siembra en la producción de maíz (*Zea mays*) híbrido

Study of high planting densities on the production of hybrid maize (*Zea mays*)

Daniel Alejandro García-López¹, Rafael Alonso Hernández²

Fecha de recepción: 22 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 16 de febrero, 2023

García-López, D.A; Hernández, R.A. Estudio de altas densidades de siembra en la producción de maíz (zea mays) híbrido . *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 160-168.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6427>

- 1 TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Libres, Departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Libres, Puebla, México.
Correo electrónico: daniel.gl@libres.tecnm.mx
 <https://orcid.org/0000-0001-8557-4895>
- 2 TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Libres, Departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Libres, Puebla, México.
Correo electrónico: rafalonhdz@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4034-402X>

Palabras clave

Intensivo; competencia; rendimiento; grano maíz; densidad.

Resumen

El maíz es el principal grano en la dieta mexicana y uno de los granos más importantes a nivel mundial. Sin embargo, debido a su alta demanda, se requieren de estrategias para obtener altos rendimientos en su cultivo. Para ayudar a resolver este problema, se evaluó el efecto de altas densidades de siembra del maíz híbrido AZ-60. Se empleó un diseño de bloques al azar en parcelas para comparar densidades de siembra de maíz en un sistema de riego por goteo y evaluar altura, diámetro de tallo, valores en el fruto y estimación del rendimiento. Se seleccionaron tres densidades de siembra para los tratamientos(T): T1) densidad de 150,000 semillas por hectárea; T2) densidad de 120,000 semillas por hectárea; T3) densidad de 90,000 semillas por hectárea. Durante el periodo de cosecha se determinó que variables como la altura de planta y diámetro de tallo no mostraron diferencias significativas. Sin embargo, en variables de la mazorca como número de hileras, granos por hilera y peso de grano, se observó que los mayores valores se presentaron en la densidad de siembra de 90,000 semillas por hectárea. Como resultado, al estimar el rendimiento de grano se observaron diferencias ($p < 0.05$) entre los tratamientos, observándose el mayor en T3 con 7.55 toneladas por hectárea; por su parte los tratamientos T2 y T1 se estimaron 5.50 y 5.27 toneladas por hectárea, respectivamente. Se concluyó, que las diferencias observadas pueden ser atribuidas al aumento de la competencia intraespecífica por recursos a mayores densidades de siembra.

Keywords

Intensive; competition; yield; corn grain; density.

Abstract

Corn is the main grain in the Mexican diet and one of the most important grains worldwide. However, due to its high demand, strategies are required to obtain high yields during its cultivation. In order solve this problem, the effect of high planting densities of the hybrid maize AZ-60 was evaluated. A randomized block design was used in plots to compare maize planting densities in a drip irrigation system and height, stem diameter, fruit values and yield estimation, were evaluated. Three planting densities were selected for the treatments(T): T1) density of 150,000 seeds per hectare; T2) density of 120,000 seeds per hectare; T3) density of 90,000 seeds per hectare. During the harvest period, it was determined that variables such as plant height and stem diameter did not show significant differences. However, it was observed that fruit variables such as number of rows, grains per row and grain weight, the highest values were presented in plant density of 90,000 seeds per hectare. As a result, when estimating the grain yield, differences ($p < 0.05$) were observed between the treatments, the highest being observed in T3 with 7.55 tons per hectare; meanwhile, treatments T2 and T1 were estimated at 5.50 and 5.27 tons per hectare, respectively. It was concluded that the differences observed can be attributed to the increase in intraspecific competition for resources at higher planting densities.

Introducción

El maíz es un producto agrícola de alto valor siendo el tercer cereal con mayor importancia en la nutrición humana, en particular México se posiciona como el octavo productor a nivel mundial y uno de los mayores consumidores del producto con un consumo per cápita de 123 Kg [1].

La siembra de maíz es de suma importancia para la economía, ya que, se puede aprovechar o bien el grano en la dieta o el forraje para alimentar ganado, por lo cual anualmente en México se establecen entre 7.5-8 millones de hectáreas para la cosecha de grano y 608, 700 para maíz forrajero [2].

Debido a su importancia mundial y nacional han surgido distintas propuestas orientadas a incrementar su productividad. La mayor parte de las mejoras se han centrado en el fitomejoramiento, para la obtener híbridos altamente productivos, mientras que el resto de las mejoras se han orientado en mejorar el manejo agronómico [1]. Un ejemplo de estas últimas es la siembra a altas densidades. El uso de altas densidades de maíz permite aumentar el rendimiento por unidad de superficie. Sin embargo, la densidad de siembra optima puede variar dependiendo de diferentes aspectos que van desde el genotipo, fertilidad, manejo agronómico o el objetivo a lograr como puede ser grano, forraje o ambos [3].

En el maíz la densidad de siembra constituye uno de los aspectos de manejo que incide en el rendimiento final. Por un lado, a bajas densidades se asegura una mayor cobertura durante la floración, por otro lado, en cultivos bien manejados y con altas densidades se alcanzan las coberturas para una máxima productividad [4]. De tal modo que el incremento de la densidad de siembra puede estimular un incremento del rendimiento del cultivo, debido a que se estimula la disminución en el grosor del tallo provocando su elongación y tamaño por la competencia lumínica [5]. Por otro lado, algunos autores [6] [7] han argumentado que el incremento de altas densidades de siembra en maíz puede aumentar la competencia intraespecífica por radiación solar, nutrientes y agua, reduciendo el rendimiento por planta en altas densidades de siembra. Por consiguiente, la densidad adecuada es aquella que permite el máximo crecimiento y mayor rendimiento a través del uso eficiente de los recursos ambientales como nutrientes, luz y agua [8].

Es necesario mencionar que diferentes híbridos de maíz tienen un comportamiento diferencial frente las altas o bajas densidades de siembra, debido a la plasticidad genética para ajustar la morfología y fisiología en cada variedad [6]. De tal motivo que estudiar la respuesta de variedades de maíz híbrido al efecto de las altas densidades de siembra permitirá conocer su comportamiento para encontrar la densidad óptima y obtener un mayor rendimiento de cosecha. Por consiguiente, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la alta densidad de siembra sobre el rendimiento en grano del cultivo de maíz híbrido AZ60 bajo sistema de riego por goteo.

Material y métodos

Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló dentro de las áreas de cultivo del Instituto Tecnológico Superior de Libres, en la ciudad de Libres, Puebla, México. El municipio de Libres se localiza en la parte centro norte del estado de Puebla a una altitud de 2,378 msnm y una precipitación anual promedio de 650 mm. Las coordenadas geográficas son los paralelos 19° 27' 52" de latitud norte y los meridianos 97° 41' 52" de longitud oeste. En el municipio presenta un clima que puede variar desde templado subhúmedo con lluvias en verano (88%), a semifrío subhúmedo con lluvias en verano (7%) y semiseco templado (5%), con un rango de precipitación de 400 - 900 mm y temperatura de 10 - 16°C [9]. El suelo dominante es Leptosol (40%), Phaeozem (25%), Regosol (17%), Fluvisol (8%), Arenosol (7%) y Durisol (1%) [9]. Adicionalmente muestras del suelo se enviaron a un laboratorio certificado para conocer la composición del lugar de cultivo (cuadro 1).

Cuadro 1. Características físico-químicas del suelo del Instituto Tecnológico Superior de Libras, Puebla, donde se evaluó el cultivo de diferentes densidades de siembra en el maíz híbrido AZ60.

Parámetro	Valor
pH	6.67
MO (%)	1.24
CE extracto (ds m ⁻¹)	3.24
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.07
P-Bray (ppm)	133
K (ppm)	598
Ca (ppm)	2132
Mg (ppm)	324
Na (ppm)	124

Manejo agronómico

Como labores previas se realizó la limpieza del lugar donde se removió el rastrojo del cultivo anterior y hierbas del terreno, posteriormente se realizó un rastreo y 15 días después se realizó un barbecho, finalmente un día antes de realizar la siembra se realizó un segundo rastreo y el día de la siembra se realizaron surcos con la ayuda de un tractor. La fecha de cultivo se realizó el 14 de abril del 2021, colocando las semillas de manera manual y aplicando un riego al finalizar.

Para proveer la nutrición del cultivo, se realizó un abonado antes de realizar la siembra con 200 Kg ha⁻¹, de fertilizante comercial 18-46-00 (18% N, 46% P y 00% K). Posteriormente, a los 58 días, se realizó una segunda aplicación de fertilizante con 300 Kg ha⁻¹, de fertilizante comercial 16-16-16 (triple 16), (16% N, 16% P y 16% K).

Para el control de malezas, a los 24 días, se realizó una aplicación de herbicida con 50 ml de mesotrione: 2-(4-Mesil-2-nitrobenzoil)-ciclohexano-1,3-diona (Equivalente a 60.0 g de i.a. L⁻¹ 20°C). atrazina: 6-Cloro-N2-etil-N4-isopropil-1,3,5-triazina-2,4-diamina (Equivalente a 383.6 g de i.a. L⁻¹ 20°C).

Se realizaron cinco riegos de auxilio, el primero el día 24 de abril, el segundo el día 7 de mayo, el tercero el día 24 de julio, el cuarto y quinto se realizaron los días 7 y 14 de agosto, respectivamente. Cabe mencionar que durante el proyecto se presentaron lluvias, lo que favoreció al cultivo y la disminución de aplicaciones de riegos.

Diseño experimental

El cultivo se estableció en un área de 5 metros de ancho por 66 metros de longitud (330 m²), dentro de la cual se establecieron las parcelas experimentales para cada tratamiento. Se delimitaron tres bloques, cada uno con extensión de 22 metros de longitud y 5 metros de ancho, con 5 surcos cada uno. Dentro de cada bloque se delimitaron al azar las parcelas para cada tratamiento de densidad de siembra.

Dentro de cada bloque se establecieron los respectivos tratamientos : T1) siembra en líneas espaciadas a 0.8 m, con una distancia entre semillas de 0.08 m y densidad de 150,000 semillas ha⁻¹; T2) siembra en líneas espaciadas a 0.8 m, con una distancia entre semillas de 0.1 m y densidad de 120,000 semillas ha⁻¹; T3) siembra en líneas espaciadas a 0.8 m, con una distancia entre semillas de 0.13 m y densidad de 90,000 semillas ha⁻¹, los tres tratamientos se sembraron con la variedad AZ-60 de la marca Asgrow (figura 1).

Las variables evaluadas fueron las siguientes: se registró de la altura de la planta al momento de la madurez fisiológica con ayuda de una cinta métrica tomando la medida desde el suelo hasta la punta de la planta, el diámetro del tallo de la planta se registró con la ayuda de un Vernier de precisión. Para el número de granos por m² se cosechó una muestra en un m² y se determinó el número de filas y la cantidad de granos por filas de mazorca, de esta forma se obtuvo el número de granos por m².

Como se mencionó en la sección anterior se realizó irrigación por goteo, para lo cual se instalaron líneas de sur a norte, a 0.8 m de espaciamiento y con goteros a cada 0.2 m. El maíz empleado fue el maíz híbrido de la marca Asgrow de Bayer, de la variedad AZ-60 que se adquirió en una tienda especializada de la región.

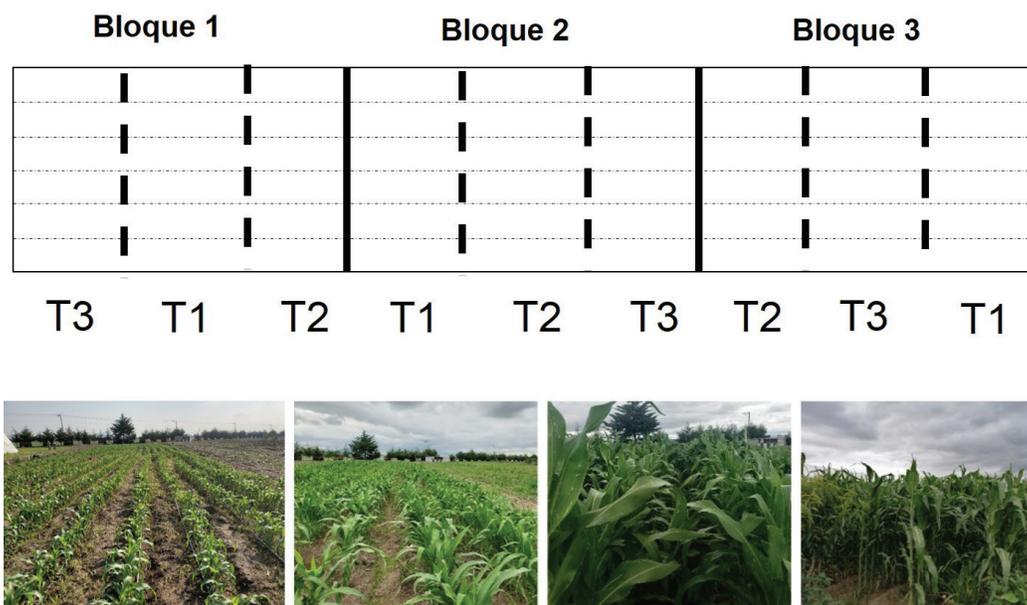


Figura 1. Diseño de bloques y parcelas donde se probaron tres densidades de siembra para los tratamientos de maíz híbrido AZ-60.

Estimación de rendimiento

Para comparar los resultados se estimó el rendimiento alcanzado a partir de los datos obtenidos durante la etapa experimental. Adicionalmente se obtuvieron valores de producción por superficie y peso de grano. Se realizó un conteo de las plantas existentes en 5 metros de longitud de los 5 surcos de cada parcela de manera aleatoria, después se dividió el número de plantas obtenidas entre cinco para obtener el número de plantas totales en un metro lineal. Para el número de granos por gramo, se desgranó manualmente las mazorcas de un metro lineal de cada muestra y se pesó 50 gramos, se contó el número de granos y se dividió entre 50 gramos, con lo cual se obtuvo el número de granos por gramo de cada tratamiento. Con los datos obtenidos se procedió a estimar el rendimiento de grano por hectárea de cada tratamiento, a fin de tener una comparación de los tratamientos.

Análisis estadístico

Se empleó un diseño por bloques al azar. Los resultados se compararon mediante comparación de medias ($p < 0.05$) y las diferencias entre medias se resolvieron mediante prueba de Tukey. Los datos se analizaron mediante software estadístico Minitab versión 19.

Resultados y discusión

El análisis de resultados demostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las diferentes densidades de siembra, esto se presentó en las variables número de hileras por mazorca, número de granos por hilera y número de granos por m^2 (Cuadro 2). Los mayores valores se observaron en la menor densidad de siembra ($90,000$ semillas ha^{-1}), mientras que las mayores densidades mostraron significativamente menores valores de las variables mencionadas. En contra parte, no se observaron diferencias significativas en las variables altura de plantas o diámetro de tallo. De este modo, las diferentes densidades de siembra en el maíz híbrido AZ-60 de la marca Asgrow, no afectaron las variables del crecimiento vegetal. En promedio las plantas, sin importar la densidad de siembra, alcanzaron un promedio de altura alrededor de 2.5 metros con diámetros de tallo alrededor de 21 cm.

Las variables que se cuantificaron a partir de la mazorca fueron las más afectadas como resultado de las diferentes densidades de siembra, en general las mejores mazorcas se obtuvieron en la densidad de $90,000$ semillas ha^{-1} . Por lo cual si el objetivo de siembra es producción de grano la densidad de T3 es la más adecuada, en contraparte si la finalidad sería para maíz forrajero, no hay diferencias en las características de las plantas entre las diferentes densidades de siembra seleccionadas.

Cuadro 2. Comparación de las variables obtenidas en tres densidades de siembra de maíz híbrido AZ-60.

Tratamientos	Altura (m)	Diámetro de tallo (m)	No. de hileras por mazorca	No. de granos por hilera	No. de granos por m^2
T1	2.56 ^a	0.206 ^a	13.81 ^b	21.11 ^b	1,942 ^b
T2	2.50 ^a	0.214 ^a	12.17 ^b	22.63 ^b	1,916 ^b
T3	2.48 ^a	0.231 ^a	14.10 ^a	24.95 ^a	2,341 ^a

Letras diferentes representan diferencias significativas de acuerdo a prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Al valorar la estimación del rendimiento (cuadros 3-5) se observó que el tratamiento tres ($90,000$ plantas ha^{-1}) fue donde se obtuvo el mayor rendimiento por grano, a pesar de ser el tratamiento con el menor número de plantas. Lo anterior pone en evidencia que una mala elección en la densidad de siembra influye directamente en el rendimiento, ya que, con las densidades altas, la competencia entre plantas es mayor, lo que aumenta el número de plantas adultas estériles y mazorcas más pequeñas de menor llenado de grano [7]. En la figura 2 se puede observar gráficamente la comparación de los resultados entre las diferentes densidades de siembra.

Cuadro 3. Estimación de rendimiento T1 ($150,000$ semillas ha^{-1}).

Conceptos	Promedios Tratamiento No. 1
A No. de plantas/ m^2	9.66
B Mazorcas /planta	0.689
C Mazorcas / m^2 (A*B)	6.66
D Granos por mazorca	291.52
E Granos por m^2 (C*D)	1,942
F No. de granos por gramo, peso del fruto	3.68
G Gramos * m^2 (E*F)	527.59
H Kg / Ha = (G * 100 * 10,000 $m^2/1,000$)	5,275.88
Rendimiento promedio estimado por ha	5,275.88 Kg

Cuadro 4. Estimación de rendimiento T2 (120,000 semillas ha⁻¹).

Conceptos		Promedios Tratamiento No. 2
A	No. de plantas/ m ²	8
B	Mazorcas /planta	0.833
C	Mazorcas/ m ² (A*B)	6.66
D	Granos por mazorca	287.62
E	Granos por m ² (C*D)	1,916
F	No. de granos por gramo	3.48
G	Gramos * m ² (E*F)	550.45
H	Kg / Ha = (G * 100 * 10,000 m ² /1,000)	5,504.45
Rendimiento promedio estimado por ha		5,504.45 Kg

Cuadro 5. Estimación de rendimiento T3 (90,000 semillas ha⁻¹).

Conceptos		Promedios Tratamiento No. 3
A	No. de plantas/ m ²	6.6
B	Mazorcas/planta	1.009
C	Mazorcas/ m ² (A*B)	6.66
D	Granos por mazorca	351.54
E	Granos por m ² (C*D)	2,341
F	No. de granos por gramo	3.1
G	Gramos * m ² (E*F)	755.24
H	Kg / Ha = (G * 100 * 10,000 m ² /1,000)	7,552.44
Rendimiento promedio estimado por ha		7,552.44 Kg

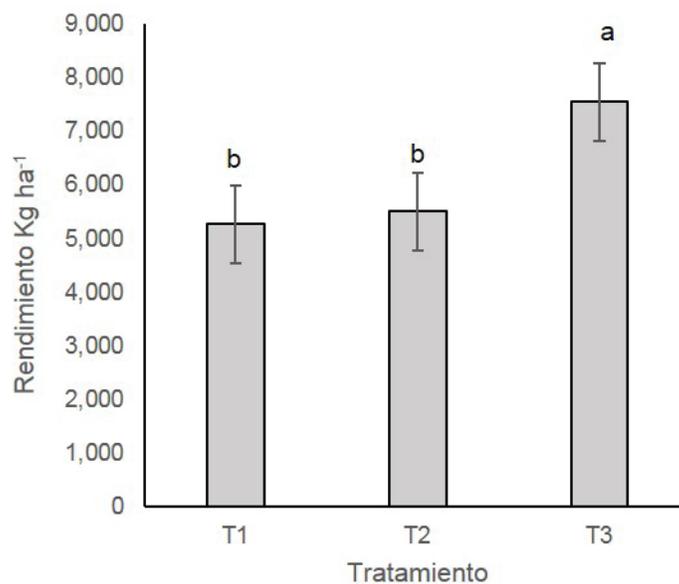


Figura 2. Comparación del rendimiento estimado entre los diferentes tratamientos de densidad de siembra del maíz híbrido AZ-60.

De acuerdo a los resultados obtenidos, de manera general se pudo observar que una mayor densidad no garantiza un mayor rendimiento en las condiciones que se desarrolló este proyecto, afectando directamente los costos de producción, ya que la semilla de maíces híbridos tiene un costo alto. Encontrar la densidad óptima de siembra es crítico para lograr el mayor rendimiento en variedades híbridas de maíz, por lo cual algunos autores han probado el efecto de altas densidades en algunas variedades de maíz híbrido.

En un trabajo reportado [10] los mayores rendimientos de 9.2 - 9.7 ton ha⁻¹ se obtuvieron en el híbrido H-311 P bajo riego y con densidades de entre 65 000 y 75,000 plantas por hectárea, respectivamente. Sin embargo, a una densidad mayor de 80,000 plantas por hectárea el rendimiento se redujo a 6.06 ton ha⁻¹ debido a una menor calidad de mazorca. Por otra parte, [11] se han probado diferentes densidades de siembra de maíz tropical encontrando alto rendimiento a densidad de 80,000 plantas por hectárea, logrando plantas de maíz de 2.86 m de altura y un rendimiento de 8.1 ton ha⁻¹. En otro trabajo [12], reportado con cruza de progenitoras híbridos H-47, H-50 y H-51, se obtuvieron altos resultados con densidad de siembra de 70,000 plantas por hectárea para el desarrollo de plantas de maíz de 2.41 m de altura, 16 hileras por mazorca y 28 granos por hilera, debido a la alta calidad de mazorca el rendimiento reportado fue de 10.15 ton ha⁻¹. En un trabajo [13] con variedad de maíz Roque y densidad de siembra de 90,000 plantas por hectárea, se obtuvieron mazorcas con 13.73 hileras por mazorca y 35.49 granos por hilera, para un rendimiento de 8.289 ton ha⁻¹. Finalmente, en otro trabajo [14] con variedad de maíz híbrido AN-447 y densidad de siembra de 80,000 plantas por hectárea se obtuvieron plantas de maíz con altura de 2.72 y un rendimiento de grano de 12.5 ton ha⁻¹. A partir de los datos anteriores, se observa que los resultados obtenidos en el presente proyecto se comparan con valores previamente reportados para variedades de maíz híbrido a altas densidades de siembra.

Un trabajo similar al presente [15] con híbrido de maíz Tigre de Monsanto, probó altas densidades de siembra y llegó a la conclusión que la densidad de 90,000 semillas ha⁻¹ fue la más adecuada para la producción de forraje o grano de maíz con riego superficial por goteo, ya que no se observó beneficio en aumentar a mayor densidad de siembra de 133,000 semillas ha⁻¹. En dicho trabajo, los autores concluyeron que el menor rendimiento se observó en las mayores densidades de siembra debido a que todas las densidades de siembra recibieron la misma nutrición, lo que posiblemente generó mayor competencia intraespecífica entre plantas de maíz a mayores densidades.

Por lo anterior, es necesario resaltar que cuando la densidad supera las demandas de los recursos disponibles, se genera estrés en el crecimiento de las plantas que repercute en menor cantidad de fotoasimilados hacia la espiga, reduciendo su rendimiento y esterilidad de granos [7] [8]. Un efecto similar fue reportado [16] al aumentar la densidad de siembra de maíz híbrido de 90,000 a 100,000 plantas por hectárea, el rendimiento de grano disminuyó drásticamente de 8.289 ton ha⁻¹ a 2.924 ton ha⁻¹, respectivamente. Lo cual pone en evidencia que los recursos como nutrientes y luz al no ser suficientes en altas densidades de siembra generan alta competencia intraespecífica y estrés, mermando el rendimiento máximo de los cultivos como se observó en el rendimiento de grano. En el presente trabajo concluimos que un efecto similar pudo haber sucedido como respuesta al crecimiento bajo altas densidades de siembra.

Conclusión

Los datos obtenidos del presente trabajo permitieron concluir que el aumento de la densidad no siempre es la mejor alternativa para incrementar los rendimientos de producción de maíz, ya que como se observó a mayor densidad menor calidad de grano y rendimiento final. Por consiguiente, aunque el incremento de altas densidades de siembra es una estrategia para

incrementar el rendimiento, es necesario la elaboración de un adecuado plan nutricional que provea las necesidades nutricionales de una mayor densidad de cultivo para obtener los mayores rendimientos posibles y asegurar que los recursos no serán limitantes para generar competencia intraespecífica y esterilidad de semillas. Los datos obtenidos tienen relevancia para los productores locales, cuyas cosechas se realizan a bajas densidades de siembra (<50,000 plantas ha⁻¹) con rendimientos por debajo de las 4 ton ha⁻¹.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Libres y al departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable por todas las facilidades prestadas para la elaboración del presente proyecto.

Referencias

- [1] F. I. Rodríguez, A. González H., D. J. Pérez L., M. Rubí A. "Efecto de cinco densidades de población en ocho cultivares de maíz sembrados en tres localidades del Valle de Toluca, México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 6, no. 8, pp. 1943-1955, 2015.
- [2] SIAP-Servicio de información agroalimentaria y pesquera, 2021. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/siap> [Consultado: 20/07/2022]
- [3] M. A. Sánchez-Hernández, C. A. Aguilar-Martínez, N. Valenzuela-Jiménez, C. Sánchez-Hernández, M.C. Jiménez-Rojas, C. Villanueva-Verduzco. "Densidad de siembra y crecimiento de maíces forrajeros". *Agronomía Mesoamericana*, vol. 22, no. 2, pp. 281-295, 2011.
- [4] P. Vallone, V. Gudelj, C. Galarza, B. Masiero, C. Vranicich, J. Nebreda Ensayo de densidad y distancia de siembra de maíz. INTA, 2010.
- [5] J. Elizondo, y C. Boschini. "Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad del forraje de maíz". *Agronomía Mesoamericana*, vol. 12, no. 2, pp. 181-187, 2001.
- [6] Y. Quevedo, J. I. Beltrán, E. Barragán-Quijano. "Effect of sowing density on yield and profitability of a hybrid corn under tropical conditions". *Agronomía Colombiana*, vol. 36, no. 3, pp. 248-256, 2018.
- [7] A. G. Cirilo. "Rendimiento del cultivo de maíz Manejo de la Densidad y Distancia entre Surcos en Maíz". *IDIA XXI*, vol. 4, no. 6, pp. 28-133, 2004.
- [8] Y. Quevedo., E. Barragan Q., J. Beltran. (2015) Efecto de altas densidades de siembra sobre el híbrido de maíz (*Zea mays* L.) impacto. *Scientia Agroalimentaria*, vol. 2, pp.18-24, 2015.
- [9] INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2021. Disponible en línea: <https://www.inegi.gob.mx> [Consultado: 20/07/2022]
- [10] J. R. Gutiérrez S. y L. F. Maximino. "Riego, densidad de plantas y fertilización nitrogenada en producción de maíz híbrido en Zacatecas". *Agricultura Técnica en México*, vol. 28, no. 2, pp. 95-103, 2002.
- [11] J. A. Carrera V., T. Cervantes S. "Respuesta a densidad de población de cruza de maíz tropical y subtropical adaptadas a valles altos". *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 29, no. 4, pp. 331-338, 2006.
- [12] M. Tadeo-Robledo, A. Espinosa-Calderon, N. Chimal, I. Arteaga-Escamilla, V. Trejo-Pastor, E. Canales-Islas, M. Sierra-Macías, R. Valdivia-Bernal, N. O. Gómez-Montiel, A. Palafox-Caballero, B. Zamudio-González. "Densidad de población y fertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles". *Terra Latinoamericana*, vol. 30, no. 2, pp. 157-164, 2012.
- [13] F. Cervantes-Ortíz, M. T. Gasca O., E. Andrio E., M. Mendoza E., L. P. Guevara A., F. Vázquez M., S. Rodríguez H. "Densidad de población y correlaciones fenotípicas en caracteres y rendimiento de maíz". *Ciencia y Tecnología Agropecuaria México*, vol. 2, no. 1, pp. 9-16, 2014.
- [14] C. P. Yescas, M. A. Segura C., C. Martínez, V. P. Álvarez R., J. A. Montemayor T., J. A. Orozco V., J. E. Frías R. "Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas". *FYTON*, vol. 84, pp. 272-279, 2015.
- [15] A. Guevara-Escobar, G. Barcenas-Huante, F. R. Salazar-Martínez, E. González-Sosa, H. Suzán-Azpíri. "Alta densidad de siembra en la producción de maíz con irrigación por goteo subsuperficial". *Agrociencia*, vol. 39, no. 4, pp. 431-439, 2005.
- [16] F. Cervantes-Ortíz, J. A. Covarrubias-Prieto, J. A. Rangel-Lucio, A. D. Terrón-Ibarra, M. Mendoza-Elos, R. E. Preciado-Ortiz. "Densidad de población y fertilización nitrogenada en la producción de semilla híbrida de maíz". *Agronomía Mesoamericana*, vol. 24, no. 1, pp. 101-110, 2013.

Toxicología de micro y nanoplásticos: riesgo de tóxicos a dosis baja y cambios epigenéticos

Toxicology of micro and nanoplastics: risk of toxic at low dose and epigenetic changes

Virginia Montero-Campos¹,
Lucía Noboa- Jiménez², Luis Gómez-Vargas³

Fecha de recepción: 6 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 27 de febrero, 2023

Montero-Campos, V; Noboa- Jiménez, L; Gómez-Vargas, L.
Toxicología de micro y nanoplásticos: riesgo de tóxicos a do-
sis baja y cambios epigenéticos . *Tecnología en Marcha*. Vol.
36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 169-180.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6417>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: vmontero@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2666-5030>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: biotecnoboa@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-4099-6573>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: aleluisgomez@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-7440-2094>

Palabras clave

Microplásticos; nanoplásticos; disruptores endocrinos; epigenética; BPA.

Resumen

Los riesgos toxicológicos asociados a los nano y microplásticos (NMP) están relacionados directamente con la ingestión por vía oral de estas partículas, generalmente por fragmentación de envases y su consiguiente presencia en productos alimenticios naturales, agua de consumo y otros artículos que son productos básicos en nuestra vida diaria. Las partículas cuyo destino es el océano, pueden en consecuencia, ser ingeridas por especies marinas poniendo en riesgo la seguridad alimentaria teniendo acceso a los niveles más altos de la cadena trófica. Los nanoplásticos (NP), se relacionan por su pequeño tamaño y facilidad de movimiento, a la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) dentro de la célula, lo que se asocia directamente a procesos posiblemente carcinogénicos. En respuesta a la exposición constante a microplásticos (MP) podemos encontrarlos asociados a la manufactura, la presencia de sustancias plastificantes y estabilizadores tales como Bisfenol A (BPA) y Ftalatos, los cuales a dosis muy bajas están asociadas a disrupción endocrina, esto es, reemplazo de hormonas humanas en el cuerpo por parecido estructural, lo que lleva a alteraciones metabólicas con manifestaciones a lo largo de la vida inclusive de transmisión a la descendencia por efectos epigenéticos asociados. Uno de los problemas con estas sustancias es el efecto de dosis bajas, pues tienen un comportamiento llamado de “curva de respuesta de dosis no monotónica” (CRDNM) para la cual se pueden observar efectos adversos en las dosis de referencia aceptadas internacionalmente o por debajo de esta.

Keywords

Microplastics; nanoplastics; endocrine disruptors; epigenetic; BPA.

Abstract

The toxicological risks associated with nano and microplastics (NMP) are directly related to the oral ingestion intake of these particles, generally by fragmentation of packaging and their consequent presence in natural food products, drinking water and other articles that are basic products in our daily life. The particles whose destination is the ocean, can consequently be ingested by marine species, putting food security at risk, having access to the highest levels of the food chain. Nanoplastics (NP), due to their small size and ease of movement, are related to the production of reactive oxygen species (ROS) within the cell, which is directly associated with the possible carcinogenic processes. In response to constant exposure to microplastics (PM) we can find associated with manufacturing, the presence of plasticizing substances and stabilizers such as Bisphenol A and Phthalates, which at very low doses are associated with endocrine disruption, that is, hormone replacement in the body due to structural resemblance, which leads to metabolic alterations with manifestations throughout life, including transmission to offspring due to associated epigenetic effects. One of the problems with these substances is the effect of low doses, since they have a behavior called “non-monotonic dose response curve” (NMDRC) for which adverse effects can be observed at or below the internationally accepted reference doses.

Introducción

Debido a su alto peso molecular y a la falta de análogos naturales, los plásticos convencionales no se biodegradan fácilmente en el medio ambiente, por lo que pueden desintegrarse físicamente en piezas más pequeñas sin descomponerse, favoreciendo su persistencia en el medio ambiente [1]. La fragmentación del plástico causa la formación de partículas de tamaño determinado llamadas microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP), que pueden describirse como partículas con estructura interna que se caracterizan por su gran capacidad de adsorción y bioacumulación de contaminantes que pueden tener un impacto potencialmente dañino en las células vivas [2]. La comunidad científica está utilizando las siguientes categorías de tamaño para la clasificación de los diferentes grupos de partículas de plástico: nanoplásticos (1nm – 1µm), microplásticos (1µm – 1mm), mesoplásticos (1mm – 1cm) y macroplásticos (1cm – 100cm) [3].

Con respecto a los tipos de plásticos más usados en relación con el contacto estrecho con los seres humanos se puede mencionar a los termoplásticos. Estos pueden reciclarse y remodelarse reconociendo varios tipos diferentes: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PUR), caucho estireno-butadieno (SBR); de preocupación a la salud humana el PS, PVC, SBR; además las fibras microplásticas (MF) que están hechas de poliéster (PES) o (PP) [3].

Los micro y nanoplásticos (MNP) comparten algunas características importantes con respecto a su comportamiento e importancia a la salud, la mayoría de los trabajos científicos se refieren a ambos tipos bajo una sola denominación. Los MNP primarios están presentes en el medio ambiente por medios directos (que representan del 15 al 31 % de los desechos oceánicos), por ejemplo, de los textiles durante el lavado (35 %), el desgaste de los neumáticos (28 %) y los cosméticos (2 %); los MNP secundarios surgen después de la fragmentación de artículos de plástico, recubrimientos poliméricos y/o desechos plásticos, por ejemplo, botellas de plástico, bolsas y redes de pesca, o por fragilización inducida por abrasión o envejecimiento (69–81% de los desechos oceánicos) [4]. Los pequeños desechos plásticos resultantes detectados en el agua, el suelo, el aire y los alimentos son de naturaleza heterogénea con una gran variedad de tamaños y formas (principalmente fibras, pero también partículas, fragmentos y películas) y tienen una composición muy compleja, que incluye materiales poliméricos y mezclas de productos químicos (monómeros residuales, aditivos y contaminantes químicos adsorbidos), biomoléculas y microorganismos [4].

Exposición a MNP

La exposición a los NP puede ocurrir por consumo oral, inhalación involuntaria o a través de la piel [4]. La ruta más común de exposición humana es a través del consumo oral, ya que ingresa al cuerpo directamente a través de los alimentos. Actualmente se han encontrado en una gran cantidad de productos alimenticios como la sal marina y el agua del grifo en todo el mundo y actualmente no existe una legislación para los microplásticos y nanoplásticos como contaminantes en los alimentos o agua de bebida [5]; siendo un problema actual la alta tecnología requerida para su análisis.

La fuente, ruta de exposición, toxicidad potencial los mecanismos de toxicidad y enfermedades asociadas, se ejemplifican en el esquema de la figura 1 y estos hallazgos serán analizados en esta revisión.

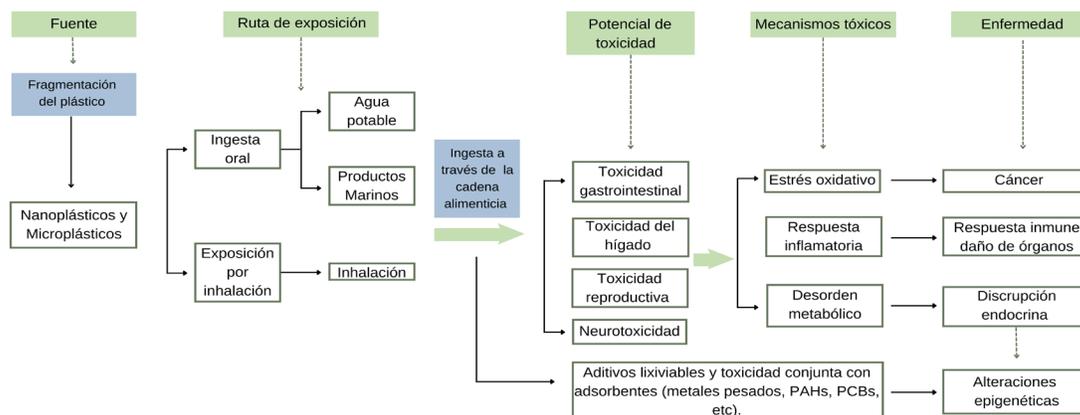


Figura 1. Rutas principales de exposición y mecanismos de toxicidad propuestos para los MNP, la vía oral se considera la ruta de exposición más relevante. Modificado de Chang et al [6].

Recientemente, investigadores han comenzado a utilizar modelos animales de mamífero para predecir el impacto potencialmente dañino de los MNP en la salud humana. Se ha encontrado que los ratones expuestos a MP de poliestireno (PS) con diámetros entre 5 y 20 μm durante 28 días mostraron la presencia de MP en el hígado, riñón e intestino. Por ejemplo, se detectaron gotas de lípidos en el hígado, lo que sugiere que los MP pueden causar trastornos del metabolismo de los lípidos e inflamación del hígado en ratones [3], en el intestino, las manifestaciones patológicas de la toxicidad de MNP incluyen cambios documentados en biomarcadores intestinales relacionados con la integridad de la barrera epitelial, la inflamación y el estrés oxidativo así como cambios en la microbiota intestinal; en el caso del hígado, se producen cambios en enzimas metabólicas clave e inducción por estrés oxidativo [7].

Imhof y Laforsch sugieren que podría existir un vínculo directo entre los niveles de efecto al organismo y el tipo o el tamaño del polímero [8]. Es notable en las NP, como las fibras sintéticas transportadas por el aire, donde su toxicidad está asociada con la longitud más que con la composición química, para los trabajadores textiles implica un riesgo de enfermedad respiratoria que podría conducir a enfermedades como el cáncer de pulmón [9]. Algunos estudios han examinado la distribución de NP en roedores después de la administración oral o intravenosa y se demostró la localización en el intestino y bioacumulación de poli (glicidilmetacrilato) NP (PGMA) predominantemente en el hígado después de 4 h con alguna evidencia de bioacumulación en la placa coriónica [10]. Los modelos en roedores muestran una de las perspectivas más realistas debido a su gran similitud genética y biológica con los humanos. Se ha planteado la hipótesis y se ha demostrado que los efectos de los MP en los organismos se relacionan con bloqueo de los intestinos, la reducción del valor nutricional de los alimentos, el aumento de la exposición a los productos químicos asociados con el plástico y la toxicidad [11].

Cambios epigenéticos inducidos por MNP

Una de las preocupaciones actuales más importantes de la influencia de los MNP son los cambios en el epigenoma. La epigenética se refiere a la interacción de factores genéticos y no genéticos involucrados en el control de patrones hereditarios de expresión génica [12] [13]. Los riesgos epigenéticos asociados a la ingesta de MNP no se limitan a los animales acuáticos, sino que también pueden acumularse en el páncreas de los humanos, a través de la ingestión

de alimentos y agua que contengan estas partículas, que son capaces de penetrar en varios tipos de tejidos [14]. Las modificaciones epigenéticas consisten en cambios hereditarios en los patrones de expresión génica regulados por la metilación del ADN, la modificación de histonas y la acción del ARN no codificante [13] [15] [16]. Investigaciones recientes en animales han proporcionado evidencia de su papel potencial en las modificaciones epigenéticas involucradas en alteraciones fisicoquímicas, que en última instancia conducen a la etiología de trastornos complejos, como cáncer, infertilidad, procesos inflamatorios y disrupción endocrina [7].

La exposición a largo plazo a partículas de plástico fragmentadas, como el poliestireno, se ha demostrado que puede causar anomalías neurodegenerativas en *Drosophila melanogaster* y *Danio rerio* reduciendo la locomoción [15] [17]. Como respuesta al estrés tóxico inducido por los MNP, los animales tienden a secretar niveles elevados de cortisol, un glucocorticoide endógeno que tiende a provocar una locomoción aberrante por la desregulación del metabolismo energético [14]. La alteración de la homeostasis de la glucosa, así como la reducción de la locomoción provocada por las partículas de plástico, puede contribuir a una reducción crítica de la vida útil de varias especies mediante la alteración de su interacción con su entorno inmediato en modelos animales [14] [18].

A continuación, se describen en el cuadro 1 algunas de las principales alteraciones biológicas producidas por MNP y en el cuadro 2 algunas alteraciones epigenéticas demostradas en diferentes organismos.

Cuadro 1. Efectos biológicos inducidos por MNP en diferentes organismos.

Organismo	Efecto biológico	Tipo de plástico	Referencias
<i>Drosophila melanogaster</i>	Reducción de la locomoción y reducción de la absorción de nutrientes. Daño intestinal, disfunción locomotora y toxicidad agravada por cadmio.	Nanopoliestireno y Micropoliestireno	Matthews et al, 2021 [19]
<i>Danio rerio</i>	Alteración metabólica de parámetros bioquímicos séricos y hepáticos, trastorno metabólico de ácidos grasos en la descendencia y tendencia a la baja del peso corporal.	Micropoliestireno	Luo et al, 2019 [20]
<i>Bos taurus</i>	Disminución de la tasa de embrión de 8 células y alteración inducida de la tasa de blastocistos en el desarrollo del embrión de mamífero.	Nanopoliestireno	Barbato et al, 2020 [21] [22]
<i>Mus musculus</i>	Alteración metabólica de parámetros bioquímicos séricos y hepáticos, trastorno metabólico de ácidos grasos en la descendencia y tendencia a la pérdida de peso corporal.	Micropoliestireno	Luo et al, 2019 [20]
<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Estimulación de las respuestas inmunitarias por un aumento significativo de la actividad bactericida de la hemolinfa.	Nanopoliestireno	Luo et al, 2019 [20]

Cuadro 2. Modificaciones epigenéticas inducidas por MNP en diferentes organismos.

Organismo	Modificación epigenética	Tipo de plástico	Referencias
<i>Drosophila melanogaster</i>	Variación del efecto de posición (metilación del ADN y acetilación de histonas de la heterocromatina).	Micropoliestireno	Zhang et al, 2020 [17]
<i>Caenorhabditis elegans</i>	Desregulación de 36 ARN no codificantes largos que modulan la toxicidad de los NP.	Nanopoliestireno	Qu et al, 2019 [23]
<i>Lepomis macrochirus</i>	Aumento de la tendencia de los niveles de metilación del ADN.	Micropoliestireno	Wilkinson et al, 2020 [24]
<i>Americamysis bahia</i>	Las respuestas a corto plazo provocaron una tendencia creciente de los niveles de metilación del ADN.	Micropoliestireno	Prior 2020, [25]
<i>Caenorhabditis elegans</i>	La represión de mir-794 en el intestino como respuesta de defensa para reducir la toxicidad de las NP.	Nanopoliestireno	Qiu et al, 2020 [26]
<i>Danio rerio</i>	Desregulación en el desarrollo neuronal y vías de enfermedades neurológicas; desregulación de los genes del músculo cardíaco involucrados en la contracción y el desarrollo.	Nanopoliestireno	Pedersen et al, 2020 [27]

Producción de ROS (especies reactivas del oxígeno)

Las ROS son moléculas altamente reactivas que desempeñan un papel clave en la señalización celular en los metabolismos aeróbicos, que están controlados por mecanismos antioxidantes para prevenir el estrés oxidativo. La presencia de MNP en ambientes acuáticos puede inducir la expresión de genes involucrados en la producción de enzimas que catalizan la descomposición de ROS, lo que sugiere estar relacionado con la ocurrencia de estrés oxidativo en organismos marinos [28]. La actividad enzimática antioxidante puede ser un parámetro para determinar desequilibrios en la producción de ROS, la glutatión peroxidasa (GP) es una enzima importante involucrada en la descomposición de ROS y, por otro lado, la glutatión reductasa (GR), por ejemplo, se ha demostrado que el nanopoliestireno altera este sistema oxidativo al reducir la expresión de genes asociados con GR e inducir la actividad de GP. Esto puede causar susceptibilidad a factores estresantes ambientales adicionales (incluidas otras NP), efectos fisiológicos a largo plazo, deterioro de la función inmunológica e incluso tasas de supervivencia más bajas en modelos animales [29].

Aditivos en plásticos y su impacto a la salud humana: BPA y Pftalatos

Los aditivos plásticos o los contaminantes químicos que se unen a los MNP en el medio ambiente (p. ej., contaminantes orgánicos hidrofóbicos y metales pesados) pueden tener una variedad de efectos tóxicos, incluidos efectos cancerígenos y epigenotóxicos potenciales. El Bisfenol A (BPA), se usa ampliamente en la producción de plásticos y resinas sintéticas como agente estabilizador y antioxidante en un rango típico de 0.05 – 3 (% p/p), (la cantidad depende de la sustancia química, estructura del aditivo y del polímero plástico). El Benzyl butyl phthalate (BBP); Bis (2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), se usan como aditivos funcionales o plastificantes en cantidades de 10-70 (% p/p) [30]; ambos compuestos causan una amplia gama de efectos disruptivos en el cuerpo. Estas sustancias químicas son catalogadas como disruptoras endocrinas (DE), dentro de las que se pueden citar: alterar la programación fetal a nivel epigenético, puede transmitirse de generación en generación y pueden desempeñar un papel en el desarrollo de diversos trastornos crónicos más adelante en la vida humana como enfermedades metabólicas, reproductivas y degenerativas, así como algunas formas de cáncer.

Estas sustancias pueden liberarse cuando se descomponen estos en el ambiente, actualmente está demostrado la capacidad que tienen de migrar de los empaques a los alimentos que los contienen bajo condiciones específicas [31] [32].

La exposición crónica a DHEP puede inducir obesidad a través de la interrupción del metabolismo de los lípidos del huésped y la composición del microbioma intestinal. En humanos, hay datos disponibles de recién nacidos en los que la exposición temprana al DEHP alteró la composición y diversidad del microbioma intestinal. Para el plastificante BPA, también se cuenta con la evidencia de disbiosis del microbioma en pez zebra y en ratones, y nuevamente, junto con los factores del huésped (p. ej, género), se planteó la hipótesis de una asociación con trastornos metabólicos. En humanos en un modelo in vitro del microbioma intestinal, el BPA provocó distintos cambios en la composición microbiana que se asociaron con efectos hormonales y estrés oxidativo y posibles estados de carcinogénesis [33]. En su papel de disrupción endocrina provoca efectos importantes en la circulación de hormonas lo que puede provocar ser fisiológicamente activo, e incluso una baja concentración de disruptor puede alterar el equilibrio natural de las hormonas endógenas en circulación [34].

La exposición de BPA en células epiteliales mamarias humanas puede silenciar el gen de la proteína de membrana 3 asociada a los lisosomas (LAMP3), que está relacionada con la autofagia y el riesgo de cáncer de mama [35] [36]. Además, un estudio sobre la línea celular de adenocarcinoma de cuello uterino humano (HeLa) demostró que el retraso en la fase G1 y la disminución de la expresión de ciclina (D, E) inducida por nanopoliestireno pueden estar asociado también con carcinogénesis [36].

La mezcla de isómeros ramificados 4-nonilfenol (BPA) se ha utilizado en todo el mundo como tensioactivo y puede tener efectos de alteración endocrina en los organismos acuáticos. Por ejemplo, induce la formación de testículo-óvulos (es decir, tejido testicular y ovárico en la misma gónada) o la inversión sexual de macho a hembra de varios peces teleósteos. Recientemente Horie et al [35], demostraron que la expresión alterada del gen *gsdf* está asociada con la interrupción de la diferenciación gonadal en embriones de medaka japonesa (*Oryzias latipes*) expuestos a metiltestosterona o bisfenol A, lo que sugiere que *gsdf* podría ser útil como un biomarcador para predecir el impacto de los químicos disruptores endocrinos sobre diferenciación gonadal. Cuando los óvulos fecundados de medaka se expusieron de 32 a 100 µg/L de 4-NP, se observaron testículos-óvulos en machos genéticos y reversión de sexo de macho genético a hembra fenotípica. En la etapa 38 (justo antes de la eclosión), la exposición a 4-NP a 1-100 µg/L no afectó la expresión de *gsdf* en los embriones XX en comparación con el control no tratado; sin embargo, en los embriones XY, la expresión de *gsdf* en el grupo expuesto a 100 µg/L fue significativamente menor que en los controles. La concentración de 4-NP a la que se suprimió la expresión de *gsdf* fue igual a aquella a la que se indujeron testículo-óvulos y reversión sexual. Estos resultados indican que la expresión del gen *gsdf* en la etapa embrionaria en medaka es un biomarcador útil para predecir el impacto de los DE en la diferenciación sexual [35].

En general los NP se han asociado con eventos bioquímicos crucialmente involucrados en la carcinogénesis, como alteraciones genómicas, incluidas aquellas que alteran la expresión génica, y potencialmente afectan la modificación postraduccional, estrés oxidativo, daño de membrana y fragmentación del ADN, así como citotoxicidad, la mayoría de los cuales han sido descritos por Grber et al en su ensayo "Hallmarks of Cancer" como propiedades que permiten la malignidad [39].

Disruptores endocrinos, efecto de dosis baja y respuestas de dosis no monotónicas

Durante décadas, los estudios de sustancias químicas DE han desafiado los conceptos tradicionales en toxicología humana, en particular por el dogma de “la dosis hace el veneno”, porque los DE pueden tener efectos en los seres humanos y en modelos animales en dosis bajas que no son predichas por los efectos a dosis más altas [34].

Los efectos de dosis bajas fueron definidos por la Agencia de Protección Ambiental de EUA (USEPA) y el Programa Nacional de Toxicología de EUA, como aquellas dosis que ocurren en el rango de exposiciones humanas o efectos observados a dosis inferiores a las utilizadas para los estudios toxicológicos tradicionales. Está bien establecido en la literatura endocrina que las hormonas naturales actúan en concentraciones séricas extremadamente bajas, típicamente en el rango picomolar a nanomolar. Entonces dosis bajas se definen como dosis por debajo de la cual, un cambio biológico (o daño) por un químico específico se haya dado, es decir, cualquier dosis por debajo del nivel de efecto observado más bajo (LOAEL) [34].

Entonces ese tipo de comportamientos se dan siguiendo un comportamiento de dosis-respuesta no monotónica, definida como una relación no lineal entre dosis y efecto, además los efectos de dosis bajas no pueden predecirse a través de los efectos observados en dosis altas. Por ejemplo, dosis bajas de una sustancia química podrían afectar la expresión de una hormona en el receptor del hipotálamo, un criterio no examinado en las pruebas de toxicología de dosis altas, por lo tanto, los efectos de dosis bajas podrían no ser predictivos.

La definición matemática de no monotonicidad es que la pendiente de la curva dosis-respuesta cambia de signo positivo a negativo o viceversa en algún punto a lo largo del rango de dosis examinadas, teniendo una forma de U- o de U invertida [34]. Muchos receptores hormonales se expresan específicamente en un solo o unos pocos tipos de células (por ejemplo, receptores para TSH se localizan en la tiroides), mientras que otros se pueden encontrar en todo el cuerpo. Para los receptores que se encuentran en múltiples tipos de células, diferentes efectos se producen, en parte debido a la presencia de diferentes correguladores que influyen en el comportamiento de los genes diana. Y finalmente, algunas hormonas tienen múltiples receptores por ejemplo receptor de estrógeno (RE) que se expresan en diferentes cantidades en diferentes células tipo y órganos y puede producir efectos variables en expresión de genes o fenómenos celulares (proliferación celular vs. apoptosis) [34]. Los niveles fisiológicos típicos de las hormonas endógenas son extremadamente bajos, en el rango de 10 a 900 pg/mL para estradiol, 300–10 000 pg/mL de testosterona y 8–27 pg/mL para T4 [34].

Con respecto al cálculo de una dosis de referencia segura, y como se observa en la figura 2, en pruebas toxicológicas tradicionales, se analizan dosis altas para obtener la dosis máxima tolerada (DMT), el LOAEL (nivel más bajo de efectos adversos observados) y el NOAEL (dosis más alta de una sustancia que no muestra ningún efecto adverso sobre la salud), se pueden aplicar factores de seguridad para derivar la dosis de referencia, es decir, la dosis a la que se supone que las exposiciones sean seguras. Esta dosis de referencia rara vez se prueba directamente, sin embargo, cuando las sustancias químicas o las hormonas producen un comportamiento de dosis no monotónica, esto es una “curva de respuesta de dosis no monotónica” (CRDNM) se pueden observar efectos adversos en la dosis de referencia o por debajo de ella. En la figura 2 las dosis que se probarían se muestran con una línea discontinua y la dosis segura calculada se indica con una línea continua gruesa. La respuesta real, en forma de U, se muestra mediante una línea sólida delgada, los datos experimentales indican que los DE y las hormonas no tienen NOAEL ni dosis umbral y, por lo tanto, ninguna dosis puede considerarse segura [34].

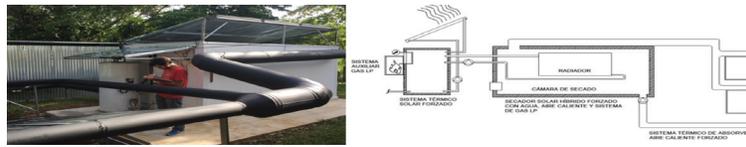


Figura 2. CRDNM típica de DE en forma de U, la línea delgada sólida se considera “dosis segura”, Modificado de Vandenberg et al [34].

Perspectivas y desafíos

La Figura 3 resume cómo la fabricación descontrolada de materiales plásticos termina en la acumulación de sus residuos en ambientes acuáticos que, tal como se observa en modelos animales, pueden transferirse a través de la cadena alimentaria hasta llegar a las personas y penetrar en órganos sensibles e inducir modificaciones genéticas cuya severidad del impacto varía según las propiedades físicas (tamaño, forma y densidad) y químicas de las partículas plásticas fragmentadas, según los aditivos acompañantes, de especial cuidado el BPA [37].

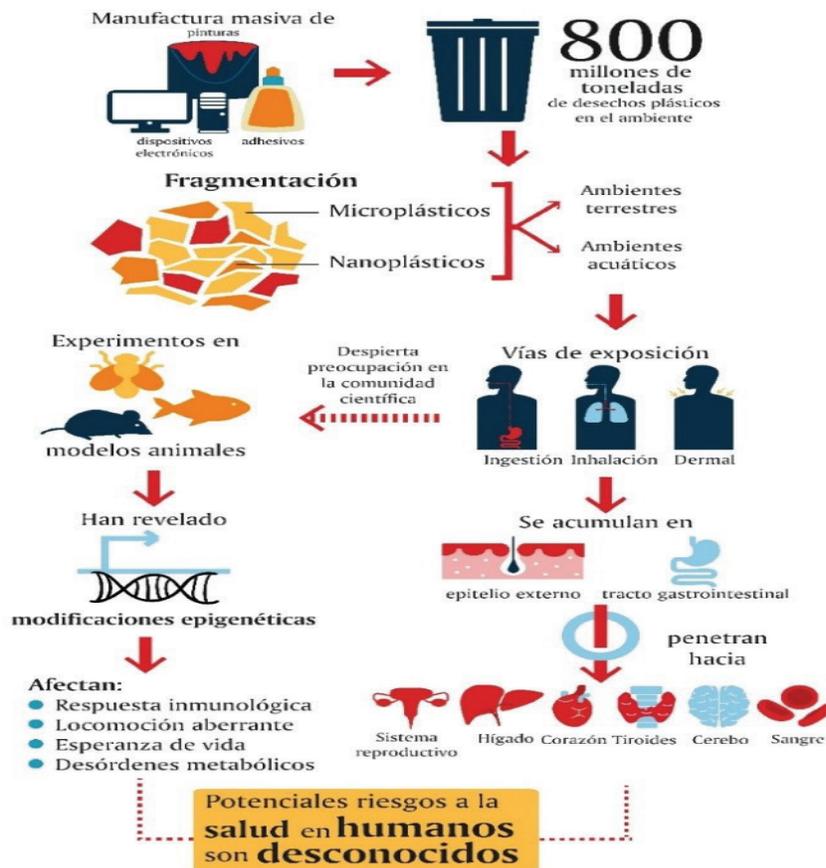


Figura 3. Resumen ilustrativo del riesgo actual de bioacumulación de MNP liberados al medio ambiente como producto de la fabricación masiva mundial de productos plásticos.

La ingestión de alimentos o agua que contienen MNP puede provocar cambios epigenéticos que aumentan la susceptibilidad de los organismos a las enfermedades crónicas, considerando esto, existe evidencia de que la contaminación por MNP representa un riesgo real para la salud, el cual podría ser irreversible y cuanto más plástico se produzca, más tendrá que sufrir la próxima generación sus efectos, que aún no se comprenden por completo [38].

A pesar de toda esta evidencia, los plásticos seguirán siendo una parte insustituible de la vida diaria por el momento, siendo urgente al menos, un cambio de hábitos personales. Por un lado, en el campo de las tecnologías de la comunicación y la salud, ambos fuertemente ligados al aspecto social del desarrollo sostenible, por otro lado, las tecnologías que promueven estilos de vida eficientes en recursos con sostenibilidad ambiental, se basan en los plásticos y sus propiedades versátiles.

El impacto ambiental a futuro de los plásticos, está determinado en gran medida por el diseño ecológico de los productos y la eficiencia de los sistemas de gestión de residuos. Los expertos y las partes interesadas de diferentes disciplinas, deben trabajar juntos para resolver las complejas interrelaciones entre los desechos plásticos y la formación de MNP liberadas al ambiente. La propia industria de los polímeros está llamada a proporcionar productos de plástico biodegradables comprobados, (no confundir con biodestructible, pues esta confusión ha llevado a agravar el problema), así como la necesidad de ofrecerle al mercado productos de diseño seguro. Con el aumento de la producción de plásticos, también existe una necesidad creciente de investigar finalmente la interacción de los MNP con los organismos vivos de manera sistemática y exhaustiva, y su posible conexión con la patogénesis de enfermedades crónicas e irreversibles, y de influencia en las próximas generaciones [39].

Existe una creciente necesidad científica por establecer novedosas pruebas bioquímicas para la determinación de la seguridad de los MNP y el control de estos tipos de partículas y las sustancias asociadas para proteger la salud humana y darle a los tomadores de decisiones parámetros más seguros desde la perspectiva del riesgo toxicológico. Urge la necesidad de valorar las sustancias con pruebas de dosis reales de riesgo sustituyendo las tradicionales pruebas de dosis máximas permitidas.

La necesidad de ejercer control desde la gestión de residuos para evitar que desechos plásticos lleguen a los ríos, es una necesidad urgente de abordar, y esto con impacto mundial, lo cual no ha sido evaluado como una emergencia. Los desafíos que los tomadores de decisiones y la comunidad científica deben enfrentar para mitigar el impacto ambiental de los desechos plásticos en los cuerpos de agua, deben generar tecnología con ayuda política para controlar y así reducir la disposición no regulada de partículas plásticas en ecosistemas, aunque hay esfuerzos en este sentido, no se ha demostrado su abordaje total.

Referencias

- [1] B. Worm, H. Lotze, and I. Jubinville. "Plastic as a Persistent Marine Pollutant". *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 42, no. 1, pp. 1–26, 2017. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-102016-06070>
- [2] Gopinath, V. Saranya, and S. Vijayakumar. "Assessment on interactive prospectives of nanoplastics with plasma proteins and the toxicological impacts of virgin, coronated and environmentally released-nanoplastics". *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 8860, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-45139-6>
- [3] B. Jiang, A. Kauffman, and L. Li. "Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics": a review. *Environ Health Prev Med* 25-29, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00870-9>
- [4] Vethaak, A. Dick, and Juliette Legler. "Microplastics and human health." *Science* 371.6530 : 672-674, 2021.
- [5] M. Kosuth, S. Mason, and E. Wattenberg. "Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt". *PLOS ONE*, vol. 13, no. 4, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

- [6] X. Chang, Y. Xue, and L. Jiangyan. "Potential health impact of environmental micro-and nanoplastics pollution. *Journal of Applied Toxicology*", 40(1), 4-15, 2020. <https://doi.org/10.1002/jat.3915>
- [7] Yang Zhou, Jiandong Liu, Li Qian. *Epigenomic Reprogramming in Cardiovascular Disease*. Academic Press, vol 9, Pages 149-163, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814513-5.00010-6>.
- [8] H. Imhof and C. Laforsch. "Hazardous or not – Are adult and juvenile individuals of *Potamopyrgus antipodarum* affected by non-buoyant microplastic particles?". *Environmental Pollution*, vol. 218, pp. 383–391, 2016. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27431695/>
- [9] S. O'Neill and J. Lawler. "Knowledge gaps on micro and nanoplastics and human health: A critical review". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 3, pp. 100091, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100091>
- [10] D. Ho, J. Leong, and R. Crew. "Maternal-placental-fetal biodistribution of multimodal polymeric nanoparticles in a pregnant rat model in mid and late gestation". *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 2866, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03128-7>
- [11] E. Besseling, P. Redondo, and E. "Quantifying ecological risks of aquatic micro- and nanoplastic". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 49(1), pp. 32-80, 2018.
- [12] A. Moosavi, and A. Ardekani. "Role of Epigenetics in Biology and Human Diseases". *Iranian biomedical journal*, vol. 20, no. 5, pp. 246–258, 2016. <https://doi.org/10.22045/ibj.2016.01>
- [13] Lacal I and Ventura R (2018) Epigenetic Inheritance: Concepts, Mechanisms and Perspectives. *Front. Mol. Neurosci.* 11:292. 2018. doi: 10.3389/fnmol.2018.00292
- [14] C. Yong, S. Valiyaveetill, and B. Tang. "Toxicity of Microplastics and Nanoplastics in Mammalian System"s. *International journal of environmental research and public health*, vol. 17, no. 5, pp. 1509, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051509>
- [15] N. Brun, P. van Hage, and E. Hunting. "Polystyrene nanoplastics disrupt glucose metabolism and cortisol levels with a possible link to behavioural changes in larval zebrafish". *Communications Biology*, vol. 2, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0629-6>
- [16] C. Moutinho and M. Esteller. "MicroRNAs and Epigenetics". *Advances in cancer research*, vol. 135, pp. 189-220, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.acr.2017.06.003>
- [17] Y. Zhang, M. Wolosker, and Y. Zhao. "Exposure to microplastics causes gut damage, locomotor dysfunction, epigenetic silencing, and aggravates cadmium (Cd) toxicity in *Drosophila*". *Science of The Total Environment*, vol. 744, pp. 140979, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140979>
- [18] M. Auguste, T. Balbi, and C. Ciacci. "Shift in Immune Parameters After Repeated Exposure to Nanoplastics in the Marine Bivalve *Mytilus*." *Frontiers in immunology*, vol. 11, no. 426, 2020. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00426>
- [19] S. Matthews, E. Xu, and E. Roubeau. "Polystyrene micro- and nanoplastics affect locomotion and daily activity of *Drosophila melanogaster*". *Environmental Science: Nano*, vol. 8, pp. 110-121, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0EN00942C>
- [20] T. Luo, Y. Zhang, and C. Wang, X. "Maternal exposure to different sizes of polystyrene microplastics during gestation causes metabolic disorders in their offspring". *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, vol. 255, no. 1, pp. 113122, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113122>
- [21] V. Barbato, G. Talevi, and R. Gualtieri. "Polystyrene nanoparticles may affect cell mitosis and compromise early embryo development in mammals." *Theriogenology*, vol. 145, pp. 18-23, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.007>
- [22] S Bojic, M Falco, P Stojkovic. "Platform to study intracellular polystyrene nanoplastic pollution and clinical outcomes". *Stem Cells*. 38:1321-1325. 2020. DOI: 10.1002/stem.3244
- [23] M. Qu, Y. Zhao, and Q. Rui. "Identification of long non-coding RNAs in response to nanopolystyrene in *Caenorhabditis elegans* after long-term and low-dose exposure". *Environmental Pollution*, vol. 255, pp. 113-137, 2019.
- [24] S. Wilkinson. "Investigating the Epigenetic Effects of Microplastic Exposure in Bluegills (*Lepomis Macrochirus*) Using Methylation Sensitive-AFLPS". The University of West Florida, 2020.
- [25] J. Prior. "Epigenetic effects of microplastics exposure on the common mysid shrimp *Americamysis bahia* [Master's Degree Thesis]". The University of West Florida, 2020.
- [26] Y. Qiu, Y. Liu, and Y. Li. "Intestinal mir-794 responds to nanopolystyrene by linking insulin and p38 MAPK signaling pathways in nematode *Caenorhabditis elegans*". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 201, pp. 110857, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110857>

- [27] A. Pedersen, D. Meyer, and A. Petriv. "Nanoplastics impact the zebrafish (*Danio rerio*) transcriptome: Associated developmental and neurobehavioral consequences". *Environmental Pollution*, vol. 266, no. 2, pp. 115090, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115090>.
- [28] Q. Chen, M. Gundlach, and S. Yang. "Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nano-plastics toward zebrafish larvae locomotor activity". *Science of The Total Environment*, pp. 584-594, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.156>
- [29] J. Pitt, R. Trevisan, and A. Massarsky. "Maternal transfer of nanoplastics to offspring in zebrafish (*Danio rerio*): A case study with nanopolystyrene". *Science of The Total Environment*, vol. 643, pp. 324-334, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.186>
- [30] J Hahladakis, C Velis, and R. Weber. "An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling". *J Hazard Mater*, vol. 344, pp.179-199, 2018. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014
- [31] S Almeida, A Raposo, M Almeida. "Bisphenol A: Food Exposure and Impact on Human Health". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.*, von 17, 6 pp.1503-1517, 2018. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12388>
- [32] F Vilarinho, R Sendón, and A van der Kellen. "Bisphenol A in food as a result of its migration from food packaging". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 91, pp. 33-65, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.012>
- [33] T Qin, X Yang T, Guo, T Yang. "Epigenetic Alteration Shaped by the Environmental Chemical Bisphenol A". *Front. Genet.* 11:618966. 2021. doi: 10.3389/fgene.2020.618966
- [34] L Vandenberg. "Low Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses for Endocrine Disruptors". In book: *Endocrine Disruption and Human Health* (pp.141-163). 2022. DOI:10.1016/B978-0-12-821985-0.00006-2
- [35] Y. Horie, N. Kanazawa, and C. Takahashi. "Exposure to 4-nonylphenol induces a shift in the gene expression of *gsdf* and *testis-ova* formation and sex reversal in Japanese medaka (*Oryzias latipes*)". *J Appl Toxicol*, vol. 41(3), pp. 399-409, 2021. DOI 10.1002/jat.4051
- [36] T Burton, A Fedele, J Xie, L Sanderman. "The gene for the lysosomal protein LAMP 3 is a direct target of the transcription factor ATF4". *Journal of Biological Chemistry*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.RA119.011864>
- [37] T. Qin, X. Zhang, and T. Guo." Epigenetic Alteration Shaped by the Environmental Chemical Bisphenol A". *Front. Genet.* 11:618966, 2021. doi: 10.3389/fgene.2020.618966
- [38] M. Kumar, D. Sarma, and S. Shubham. "Environmental Endocrine-Disrupting Chemical Exposure: Role in Non-Communicable Diseases". *Front Public Health* 8:553850, 2020. doi: 10.3389/fpubh.2020.553850
- [39] E. Gruber, V. Stadlbauer, V. Pichler. "To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity". *Exposure and Health*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00470-8>

Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua

Community water monitoring strategy for the Jorco river micro-basin based on the analysis of physicochemical, microbiological and biological indicators of water quality

Guillermo Calvo-Brenes¹, Karla Salazar-Céspedes²

Fecha de recepción: 10 de noviembre, 2022

Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2023

Calvo-Brenes, G; Salazar-Céspedes, K. Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 181-193.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6456>

- 1 Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Autor para correspondencia. Correo electrónico: gcalvo@tec.ac.cr.  <https://orcid.org/0000-0002-7021-3509>
- 2 Estudiante de maestría. Universidad Nacional de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: karvanesc@gmail.com.  <https://orcid.org/0000-0003-0609-0484>

Palabras clave

Calidad de agua; indicadores; índice de evaluación; monitoreo hídrico; microcuenca.

Resumen

Las profundas deficiencias que enfrenta el país en políticas de gestión hídrica se reflejan en la contaminación fisicoquímica, microbiológica y biológica de los ríos nacionales. El objetivo de este estudio fue proponer una estrategia de monitoreo hídrico comunitario para mejorar la gestión del río Jorco ubicado en el cantón de Acosta. Se monitoreó la calidad del agua en la parte alta, media y baja de la microcuenca durante la época lluviosa, utilizando dos índices de calidad (ICA) fisicoquímicos: el Holandés y el Calvo-TEC; así como uno biológico: el BMWP-CR. Los indicadores de calidad de turbiedad, alcalinidad, amoníaco, nitrógeno amoniacal, nitratos, y coliformes fecales superaron los límites de permisibilidad en algunos muestreos; sin embargo, el oxígeno disuelto mostró que existen buenos niveles de oxígeno para la recuperación del río. La demanda bioquímica de oxígeno fue baja, indicando una carga orgánica baja y los macroinvertebrados mostraron un ecosistema acuático degradado. El ICA Holandés sobrevaloró la calidad del agua con respecto al ICA Calvo-TEC. Este último mostró resultados más realistas debido a que utiliza más indicadores de calidad, ya que este parte de las condiciones ambientales y la normativa costarricense. Por su parte, el ICA BMWP-CR reveló una contaminación extrema durante el mes de mayor lluvia. Se concluyó que existe un problema de contaminación en el agua del río cuyas causas principales pueden ser por la falta de cobertura boscosa en las zonas riparias, la expansión del cultivo de café, el vertido de aguas residuales domésticas y las actividades ganaderas. Por lo tanto, se propuso al consejo municipal un plan de acción y validado con ellos, con el fin de mejorar la calidad del agua con participación de diferentes actores de la zona.

Keywords

Water quality; indicators; evaluation index; water monitoring; micro-basin.

Abstracts

The profound deficiencies that the country faces in water management policies are reflected in the physicochemical, microbiological and biological contamination of national rivers. The objective of this study was to propose a community water monitoring strategy to improve the management of the Jorco River located in the canton of Acosta. The quality of the water in the upper, middle and lower part of the micro-basin was monitored during the rainy season, using two physicochemical quality indices (ICA): the Dutch and the Calvo-TEC; as well as a biological one: the BMWP-CR. The quality indicators of turbidity, alkalinity, ammonia, ammoniacal nitrogen, nitrates, and fecal coliforms exceeded the permissibility limits in some samples; however, dissolved oxygen showed that there are good levels of oxygen for river recovery. Biochemical oxygen demand was low, indicating low organic load, and macroinvertebrates showed a degraded aquatic ecosystem. The Dutch ICA overestimated the quality of the water with respect to the ICA Calvo-TEC. The latter showed more realistic results because it uses more quality indicators, since it is based on environmental conditions and Costa Rican regulations. The ICA BMWP-CR revealed extreme contamination during the month of greatest rainfall. It was concluded that there is a problem of contamination in the river water whose main causes may be due to the lack of forest cover in the riparian zones, the expansion of coffee cultivation,

the discharge of domestic wastewater and livestock activities. Therefore, an action plan was proposed to the municipal council and validated with them, to improve water quality with the participation of different actors in the area.

Introducción

Los ríos son uno de los recursos naturales de mayor importancia para la humanidad y juegan un papel esencial en el desarrollo económico, social y cultural de las comunidades, además de su importancia ambiental; sin embargo, han sido sometidos a fuertes presiones antropogénicas, encontrándose cada vez más contaminados [1]. Por ello es importante mantener la calidad de las fuentes naturales, para garantizar su sostenibilidad y aprovechamiento para las futuras generaciones.

La microcuenca del río Jorco se encuentra inmersa dentro de esta problemática socioambiental; ya que en los entornos del río se han eliminado bosques para cultivar café, principalmente en la zona alta y media del río, a pesar de su alta pendiente y cuyo cultivo colinda con las márgenes del río (Ministerio de Ambiente y Energía [2]. Por otra parte, en su zona baja se ha observado una disminución de la cobertura boscosa para dar paso a la actividad ganadera. Otra actividad que supone un factor más de riesgo para la contaminación del río Jorco, es el Tajo Hacienda río Jorco, ubicado en la parte alta de la microcuenca, donde se explotan cinco hectáreas de terreno para la extracción de arena, piedra y lastre [3]. La eliminación de cobertura boscosa para la expansión de actividades antropogénicas disminuye las barreras naturales del suelo, lo cual provoca un aumento en la escorrentía que arrastra contaminantes presentes en el suelo, sedimentos y excretas de animales silvestres o domésticos hacia los ríos, especialmente en zonas de alta pendiente [4].

En la microcuenca río Jorco se ha registrado un aumento en la población y en la construcción de edificios, viviendas, carreteras y otras infraestructuras públicas [5]. La zona urbana se concentra principalmente en la parte media de la microcuenca, donde se observan muchas residencias construidas en los márgenes del río. Las aguas residuales que se generan en estas viviendas y en otras actividades socioeconómicas como talleres mecánicos, no cuentan con tratamiento alguno antes de ser vertidas al alcantarillado público, el cual descarga a su vez, en el río Jorco o bien en terrenos ubicados alrededor del río [6].

El agua del río Jorco es utilizada principalmente para el abastecimiento de agua potable, el riego de cultivos, abrevaderos y recreación de primer contacto. A pesar de la importancia de este recurso para las comunidades locales, se carece de una línea base sobre su calidad y hay poca participación comunitaria en la implementación de iniciativas o proyectos que impulsen a mejorar la gestión de la microcuenca.

Una adecuada gestión para mejorar la calidad del río, puede ser llevado a cabo por la comunidad, resultando en importantes beneficios a la sociedad y a la integridad ecológica del río, tales como detectar los requerimientos de los usuarios en relación con los usos que se le pueden dar al agua, cambios de calidad en el río y fuentes de contaminación, lo cual permite buscar medidas de control o remediación que mejoren o prevengan el deterioro en la calidad del recurso (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [7]. Además, la participación ciudadana puede generar una cultura ambiental en la comunidad.

El monitoreo de la calidad de los ríos se puede efectuar por medio del uso de índices (ICA) e indicadores de calidad. Los ICA tienen la ventaja de reducir una cantidad grande de indicadores de calidad en un solo valor relacionado con la calidad del agua. La calidad del agua se puede

separar en rangos y colores para simplificar su interpretación [8]. Debido a que ningún ICA es de uso universal, se decidió evaluar la calidad del agua empleando tres distintos tipos de ICA: el Holandés, el Calvo-TEC y el BMWP-CR [9, 10].

El objetivo de la investigación fue proponer una estrategia de monitoreo hídrico comunitario para el mejoramiento de la gestión de la microcuenca río Jorco. La caracterización de la calidad del agua se efectuó mediante indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos. Además, se propuso una estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco con la participación de diferentes actores de la comunidad.

Metodología

Zona de estudio

La microcuenca del río Jorco tiene un área aproximada de 22 km². Se ubican entre las coordenadas geográficas 9°45'59.52" latitud norte y 84°19'32.48" latitud oeste, en la subregión Caraiques al sureste del Valle Central de la provincia de San José. El río Jorco nace en los cerros del distrito de Cedral del cantón de Aserrí, entre los distritos de San Ignacio, Palmichal y Guaitil los cuales pertenecen al cantón de Acosta (figura 1). Además, desemboca en la subcuenca del río Candelaria, que a su vez forma parte de la Gran Cuenca del río Parrita situada en la Vertiente del Pacífico Central de nuestro país (INM, 2011). Se describe una precipitación media anual que varía entre los 2000 mm a 40000 mm. La temperatura media anual oscila entre 16 y 24°C (INM, 2011)

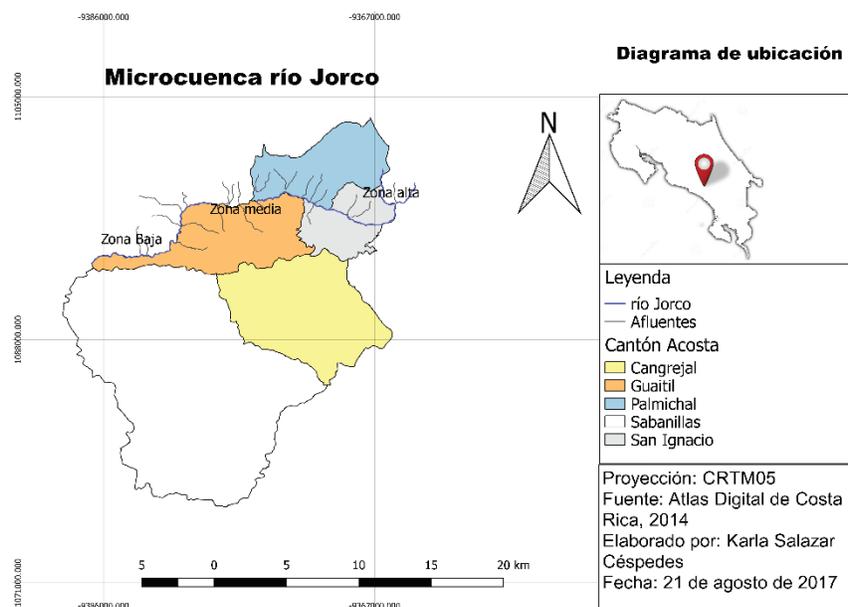


Figura 1. Ubicación de la microcuenca río Jorco. Adaptado de Ortiz, 2014 [11].

Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron tres puntos de muestreo utilizando como criterios las diferentes características socioambientales que rodean cada sitio. En el área de estudio se encuentran tres zonas bien diferenciadas según su entorno socioambiental en cuyos sitios se ubicaron los sitios de muestreo, las cuales se clasificaron como zona alta (sitio J1), zona media (sitio J2) y zona baja (sitio J3), tal y como se muestra en la figura 2.

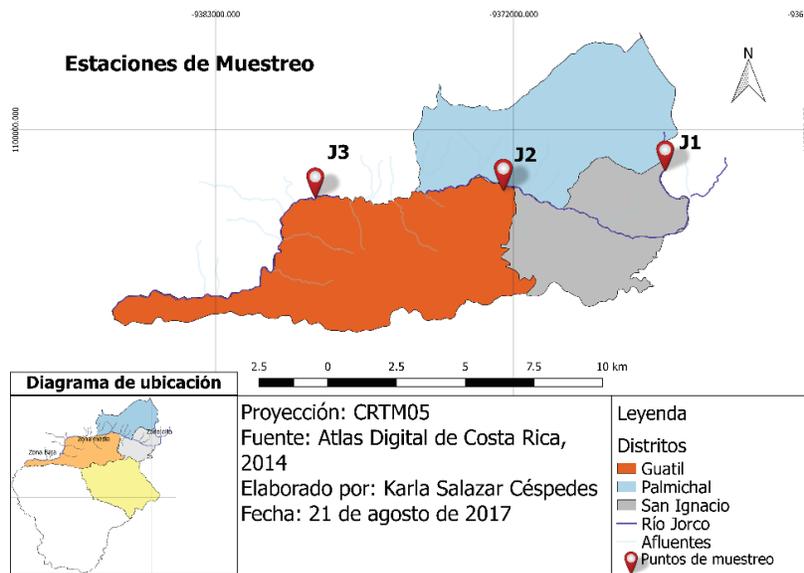


Figura 2. Estaciones de muestreo. Adaptado de Ortiz, 2014 [11].

En la zona alta (J1) predomina el bosque y el tacotal, principalmente cerca de la naciente y también hay zonas con cultivo del café; además es una zona con pendientes pronunciadas: por otra parte, no hay presencia de urbanismo. La zona media (sitio J2) se caracteriza por tener pendientes menos pronunciadas, existe una escasa zona riparia compuesta por tacotales y en su entorno también se observaron cultivos de café y parches de suelo desnudo. En esta zona se observa gran cantidad de viviendas, construidas en los márgenes del río. En la zona Baja (sitio J3) el relieve es ondulado, existe una escasa zona riparia compuesta por tacotales pero prevalecen los pastos para ganado, y en su entorno no se observa cultivos de café. No se observan viviendas, ni industrias inmediatas al río que puedan generar descargas residuales, pero sí se observan viviendas dispersas en el paisaje.

Usos del suelo

Los usos del suelo predominantes en la microcuenca están destinados para siembra de cultivos, pastos, construcción de viviendas y también se observan pequeños parches boscosos, tal y como se muestra en la figura 3.

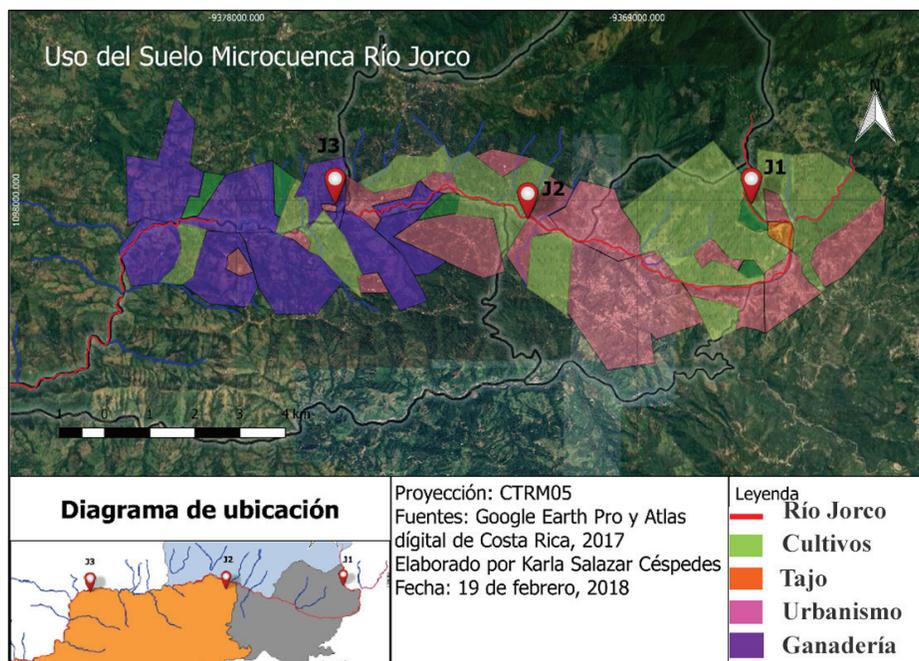


Figura 3. Usos del suelo en la microcuenca río Jorco. Adaptado de Ortiz, 2014 [11] y Google Earth Pro.

Monitoreo de la calidad del agua

Se programaron tres giras de campo para los meses de junio, agosto y octubre del 2017, meses que corresponden a la época lluviosa. La medición de los diferentes indicadores fisicoquímicos y microbiológicos, tanto en campo como en el laboratorio, así como la recolección de las muestras y su adecuada preservación, se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones dadas en el “Standard methods for the examination of water and wastewater, 3rd edition (2017) [12].

Índice Holandés

Este ICA se basa en la obtención de un puntaje de acuerdo con tres indicadores: la demanda bioquímica de oxígeno, el oxígeno disuelto el cual se mide *in situ* y el nitrógeno amoniacal. Según los niveles de contenido en agua, se efectúa una ponderación numérica, cuya suma total nos indica los niveles de contaminación en aguas de ríos [9] (ver cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de la calidad del agua en el ICA-Holandés.

Clase	Suma de Puntos	Color	Interpretación
1	3		Sin contaminación
2	4-6		Contaminación incipiente
3	7-9		Contaminación Moderada
4	10-12		Contaminación severa
5	13-15		Contaminación muy severa

Adaptado de MINAE, (2007) [9].

Índice Calvo-TEC

Este índice requiere del cálculo de subíndices (SI) de los siguientes indicadores fisicoquímicos y microbiológicos: alcalinidad, amoníaco, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos, nitratos, oxígeno disuelto, pH y turbiedad. El cálculo de los SI se realizó a través de una serie de fórmulas matemáticas, elaboradas por Calvo-Brenes [10].

Finalmente, las columnas “nivel de contaminación” y “color” sirven para interpretar la calidad de agua, según el cuadro 2.

Cuadro 2. Interpretación del ICA-PCANP.

Rango	Clase	Nivel de contaminación	Color
90.0 - 100	1	Ninguno	
75.0 - <90.0	2	Incipiente	
45.0 - <75.0	3	Moderado	
20.0 - <45.0	4	Severa	
0 - < 20.0	5	Muy severa	

Fuente: Calvo-Brenes, 2018 [8].

La fórmula de agregación (1) utilizada fue la propuesta por Dojlido (1994) [13], la cual se caracteriza por presentar una mayor sensibilidad a los cambios en la calidad del agua, además de dar una ponderación igualitaria a cada una de los indicadores utilizados en el índice. Por otra parte, el rango de clasificación de la calidad fue la propuesta por Landwehr (1974) [14] y adaptado por Calvo-Brenes (2018) [8] la cual se presenta en la figura 5.

$$ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}} \quad (1)$$

Donde, SI es el subíndice de cada indicador, y n es el número total de indicadores utilizados en el cálculo.

Índice BMWP-CR

Este ICA asocia las familias taxonómicas con un valor numérico de tolerancia entre valores de uno y nueve, siendo uno el valor mínimo para representar familias poco sensibles a sustancias contaminantes y nueve como valor máximo para representar familias asociadas a una buena calidad de agua [15]. El grado de contaminación se obtiene sumando los puntajes para cada familia de macroinvertebrados encontrados en los muestreos [9]. Su interpretación numérica se indica en el cuadro 3.

Cuadro 3. Interpretación del ICA BMWP-CR.

Nivel de contaminación	Rangos	Color
Aguas de excelente calidad	>120	
Aguas calidad buena, no contaminadas o no alterada de manera sensible	101-120	
Aguas de calidad regular, eutrófica, contaminación moderada	61-100	
Aguas de calidad mala, contaminadas	36-60	
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16-35	
Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminadas	<15	

Adaptado de MINAE, (2007) [9].

El método de muestreo, colecta y conservación de organismos utilizado fue el recomendado por el Reglamento de Evaluación y Clasificación de Cuerpos de Agua Superficial para Costa Rica [9].

Estrategia del monitoreo hídrico comunitario

El monitoreo hídrico comunitario es también denominado monitoreo basado en la comunidad, monitoreo participativo o monitoreo. Es un proceso de colaboración entre de una variedad de actores claves, tales como la comunidad, la municipalidad, las universidades y otros, para recoger, analizar los datos, y comunicar los resultados, en un intento conjunto de identificar y resolver problemas relacionados con la calidad del agua de un río [16].

Se siguió la metodología indicada por Perevochtchikopva et al [16] que consiste en cuatro etapas: Identificación del problema, monitoreo hídrico, gestión de los datos y comunicación.

Discusión de resultados

Indices fisicoquímicos y microbiológicos

La calidad del agua varió, según el tipo de ICA utilizado, el sitio de muestreo y el mes de recolección de las muestras, tal como se observa en cuadro 4.

Cuadro 4. Comparación de resultados de la calidad del agua entre los diferentes tipos de ICA.

Sitio Muestreo	Holandés				Calvo-TEC				BMWP-CR			
	Junio	Agosto	Octubre	Promedio	Junio	Agosto	Octubre	Promedio	Junio	Agosto	Octubre	Promedio
J1	4	3	3	3,3	85,5	79,0	55,5	73,3	60	44	12	38,7
J2	11	5	7	7,7	1,8	4,1	35,7	13,9	76	34	9	39,7
J3	7	6	7	6,7	1,9	4,1	2,1	2,7	57	29	10	32,0

Los resultados del cuadro 4 indican que, en general, hay similitud en la evaluación de la calidad indicada por el ICA Calvo-TEC y el BMWP-CR. No así con respecto al ICA Holandés, el cual tiende a sobrevalorar la calidad del agua. Este tipo de comportamiento ya ha sido reportado en el pasado en estudios comparativos efectuados y su principal razón es que el ICA Holandés solamente utiliza 3 indicadores de calidad, lo cual reduce sustancialmente la amplitud del análisis y su validez (Calvo-Brenes 2018).

Los meses de Agosto y Octubre mostraron mayores niveles de contaminación lo cual concuerda con la intensidad de las lluvias en estos dos meses, con relación al mes de Junio que usualmente presenta una intensidad de la lluvia menor.

Un análisis individual para cada indicador de calidad del ICA Calvo-TEC permitió evaluar cuales indicadores son los principales responsables de los cambios en la calidad del agua, tal como se observa en el cuadro 5. Las principales variaciones se debieron a la alcalinidad, los coliformes fecales, los nitratos y la turbiedad.

Cuadro 5. Valoración de la calidad del agua para cada indicador del ICA Calvo-TEC.

Muestreo	Alcalinidad	Amoniaco	Coliformes	DBO	Fosfatos	Nitratos	OD	pH	Turbiedad	Promedio
J1 Junio	53.9	88.2	88.9	98.5	97.0	97.7	95.4	100.0	95.7	85.5
J2 Junio	29.8	0.6	91.0	98.7	82.6	33.3	119.6	86.5	81.9	1.8
J3 Junio	9.3	0.6	91.0	97.4	87.6	77.4	98.8	99.0	79.0	1.9
J1 Agosto	42.5	89.4	86.3	98.6	98.1	93.8	100.5	100.0	96.0	79.0
J2 Agosto	1.4	81.4	73.5	97.8	94.2	55.1	91.4	89.7	90.7	4.1
J3 Agosto	1.4	78.3	73.5	96.4	90.8	71.3	66.7	88.3	89.6	4.1
J1 Octubre	23.3	94.0	73.5	98.8	99.8	89.6	98.2	82.5	69.6	55.5
J2 Octubre	13.0	94.1	73.5	98.8	99.8	71.3	100.0	86.9	67.9	35.7
J3 Octubre	-0.7	93.5	73.5	98.8	99.8	70.3	100.0	100.0	65.3	2.1

La alcalinidad suele estar asociada a las características mineralógicas del suelo; sin embargo, la existencia de un tajo posterior al sitio J1 (ver figura 3) puede provocar que la alcalinidad aumente en J2 y J3. El amoniaco usualmente está asociado al vertido de excretas humanas y dado que en los sitios J2 y J3 se tiene urbanismo, esta condición puede ser la causante de amoniaco en el río. En el cuadro 5 se observa un deterioro de la calidad del agua en estos puntos en la época de Junio que es la de menores lluvias, mientras que el incremento de las lluvias en Agosto y Octubre puede estar provocando una dilución por aumento del caudal y en consecuencia, una reducción de esta variable, mejorando la calidad del río en estos meses. El caso de los coliformes fecales parece incrementarse particularmente en las épocas de mayores lluvias, lo cual usualmente está asociado a contaminación en el suelo por las excretas de los animales, las cuales son acarreadas hacia los ríos durante periodos de escorrentía causado por las lluvias, de ahí su aumento en Agosto y Octubre. Lo mismo se nota con el contenido de nitratos y la turbiedad que también aumentan en esos meses. Los nitratos están asociados al uso de fertilizantes y es precisamente en el sitio J2 y J3, donde se observa un uso del suelo en cultivos (figura 3).

El contenido bajo de demanda bioquímica de oxígeno durante todos los muestreos es un indicativo de que no hay una carga orgánica excesiva sobre el río. También los niveles de oxígeno disuelto es un buen indicativo de que el río se encuentra adecuadamente oxigenado, condición necesaria para una buena degradación aeróbica de la materia orgánica disuelta o suspendida en el río por medio de microorganismos.

Indice BMWP-CR

La dinámica de la calidad del agua en el río Jorco durante los meses y estaciones de muestreo según el ICA-BMWP-CR se muestra en el cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados de la calidad del agua, dados por el índice BMWP-CR.

Sitio	Mes de muestreo		
	Junio	Agosto	Octubre
J1	60	44	12
J2	76	34	9
J3	57	29	10

En el sitio J1 en junio, el nivel de calidad del agua fue “moderada” y las familias que contribuyeron a elevar la calidad del agua fueron Perlidae, Leptophlebiidae y Ptilodactylidae, las cuales se caracterizan por su alta sensibilidad ante la contaminación. En agosto, el agua fue de “mala calidad” y las familias que aportaron a mejorar el grado de contaminación fueron Perlidae y Libellulidae. Mientras que en octubre, se encontró una calidad de agua con una “contaminación extrema” y en este muestreo solamente se recolectaron tres familias de macroinvertebrados. Las cuales fueron Elmidae, Chironomidae y Leptohiphidae, cuyas familias son muy tolerables a la contaminación.

Por otra parte, en el sitio J2 durante junio, el nivel de calidad del agua fue “moderada” y las familias que contribuyeron mejorar el nivel de contaminación fueron Blephariceridae, Leptophlebiidae, Ptilodactylidae y Psephenidae, las cuales son poco tolerables a la contaminación. En agosto la calidad de agua estuvo “muy contaminada” y las familias que más contribuyeron al grado de contaminación fueron Corydalidae y Ptilodactylidae, las cuales tienen un grado intermedio de sensibilidad a la contaminación. Mientras que en octubre, se encontró una “contaminación extrema” en el agua y en este muestreo solamente se recolectaron dos familias macroinvertebrados, las cuales fueron Simuliidae y Baetidae, cuyas familias son altamente tolerables a la contaminación.

Finalmente, en el sitio J3 durante junio, el nivel de calidad del agua fue “moderada” y las familias de macroinvertebrados que ayudaron a mejorar el grado de contaminación fueron Leptophlebiidae, Blephariceridae, Blaberidae y Psephenidae, las cuales aportaron altos puntajes por ser poco tolerables a la contaminación. En agosto, el agua estuvo “muy contaminada” y las familias que contribuyeron a elevar la calidad del agua fueron Psychodidae y Psephenidae. Mientras que en octubre, se encontró una “contaminación extrema” y en este muestreo solamente se recolectaron dos familias macroinvertebrados, las cuales fueron Simuliidae y Corydalidae, la primera de ellas es altamente tolerable a la contaminación.

Comparando la calidad de agua entre los tres sitios de muestro, se pudo observar que hubo un aumento en el nivel de contaminación a través de los meses, hasta alcanzar una contaminación muy extrema en octubre. En ese último mes de muestreo se presentaron fuertes precipitaciones a nivel nacional producto de la Tormenta Nate, que ocasionó el desprendimiento de grandes

cantidades de tierra en los márgenes del río Jorco y un aumento de los sedimentos en el cauce. Esto pudo contribuir a movilizar los sustratos del río, removiendo el bento y otros hábitats, como hojarascas y zonas lenticas donde se refugian los macroinvertebrados.

Según Lancaster [17] lo anterior se conoce como deriva catastrófica, lo cual consiste en el desprendimiento y acarreo de macroinvertebrados aguas abajo, disminuyendo su abundancia local. Este fenómeno podría explicar la poca presencia de familias encontradas en el tercer muestreo, lo que influyó en la clasificación de calidad de agua del ICA biológico, para ese mes.

Estrategia de monitoreo hídrico comunitario

Los resultados de esta investigación demostraron que en el río Jorco existen diferentes grados de contaminación en el agua de las zonas muestreadas; además, se comprobó que la integridad ecosistémica del recurso se encuentra deteriorada, principalmente por la falta de cobertura boscosa en los entornos y zonas ribereñas del río, la expansión del cultivo de café, el urbanismo y la actividad ganadera, cuyas actividades fueron observadas en los sitios de muestreo como se describió anteriormente.

En la microcuenca río Jorco no existe algún sistema de gestión que dirija sus esfuerzos en mejorar o conservar la calidad del agua para los usuarios del recurso, ni tampoco se ha involucrado o incentivado a las comunidades en participar en asuntos ambientales del cantón. Por esas razones se consideró imperioso plantear y proponer una estrategia para mejorar la gestión del río y en consecuencia la calidad del agua. La estrategia planteada consistió en proponer al consejo municipal del cantón de Acosta implementar un monitoreo hídrico comunitario siguiendo un plan de acción, que ayude en la toma de decisiones. La dinámica de este plan de acción consistió en llevar a cabo monitoreos de calidad del agua en el río Jorco, para buscar junto con la comunidad soluciones correctivas y preventivas ante el problema de la contaminación. En el cuadro 7 se muestran los componentes de esta propuesta.

Cuadro 7 . Propuesta de monitoreo hídrico comunitario para el río Jorco con el fin de implementar el monitoreo hídrico comunitario, mediante un plan de acción, para mejorar la calidad del agua en el río Jorco.

Líneas de acción	Actividades
1. Promover la cooperación institucional y de comunidades locales.	1.1. Afirmar alianzas institucionales. 1.2. Realizar un diagnóstico de participación. 1.3. Consolidar equipos de trabajo.
2. Brindar educación ambiental, técnica y científica.	2.1. Iniciar un proceso de educación ambiental no formal 2.2. Efectuar capacitaciones técnicas-científicas
3. Monitorear la calidad del agua del río Jorco.	3.1. Realizar campañas de monitoreo
4. Determinar soluciones que mejoren la calidad del agua.	4.1. Implementar medidas correctivas y preventivas propuestas por la comunidad

La primera de ellas consistió en afirmar alianzas institucionales, cuyas instituciones propuestas fueron la municipalidad del cantón de Acosta, el Instituto Nacional de Acueducto y Alcantarillados (AYA) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería. Cabe resaltar que son instituciones que cuentan con la capacidad de crear vínculos interinstitucionales y comunitarios, cuando se requiere resolver un problema ambiental a nivel local. La segunda línea se enfoca en abordar una tarea educativa dirigida a los equipos de trabajo responsables de monitorear la calidad del agua. Por un lado, la educación en el campo ambiental es un proceso que inicia desde lo preventivo, lo cual resulta más conveniente tanto en términos económicos como medioambientales. Con ese

este tipo de educación se busca promover un cambio de hábitos y actitudes cotidianas que se concreten en acciones ambientalmente adecuadas. La tercera línea de acción propuesta pretende llevar a cabo el monitoreo hídrico como tal y la última línea de acción propuesta busca proponer las soluciones que los quipos de trabajo y comunidad local han logrado construir. Por ello la actividad propuesta fue la de implementar medidas correctivas y preventivas propuestas por la comunidad. En esta investigación también se establecieron los procedimientos, las metas y tareas específicas para cada una de las líneas de acción y actividades con cada uno de los actores (para mayores detalles ver Karla 2017) [18].

Conclusiones

El ICA Holandés hace una sobrevaloración de la calidad del agua al utilizar solamente 3 indicadores de calidad. Por otra parte, hay concordancia en la valoración de la calidad del agua efectuada por el ICA Calvo-TEC y por el BMWP-CR. En general, estos dos ICA mostraron una contaminación alta en los sitios J2 y J3, los cuales parecen estar asociadas a la falta de cobertura riparia alrededor del río, el urbanismo y las actividades agrícolas y ganaderas en la mayor parte de la microcuenca del Jorco, así como la presencia de un tajo en la zona.

Con respecto a la propuesta, se concluye que la estrategia de monitoreo hídrico comunitario, presentada ante el consejo municipal del cantón Acosta, es una alternativa válida para mejorar la gestión de la microcuenca y por ende la calidad del agua del río Jorco; sin embargo, se deben de tomar en consideración las recomendaciones aportadas por miembros del consejo municipal.

El uso del ICA Calvo-TEC resultó ser una herramienta adecuada y confiable para evaluar el grado de contaminación del agua superficial, debido a que genera resultados realistas sobre la calidad de agua en comparación con el ICA-Holandés, tal como se pudo comprobar también con los estudios en campo. El uso del BMWP-CR es altamente aconsejable de usar para conocer la integridad del ecosistema hídrico, principalmente porque es fácil de aplicar y económico.

Se recomienda que la municipalidad del cantón de Acosta a través de la coordinación del departamento de gestión ambiental implemente la propuesta para mejorar la gestión del río Jorco y su calidad de agua. Algunas soluciones que se recomienda tener en cuenta son: conservar y restaurar las zonas riparias del río, optar por aplicar la Bandera Azul Ecológica con cinco estrellas en el transepto J1. Implementar el uso de sistema agrosilvopastoriles en la zona alta y media de la microcuenca, y sistemas silvopastoriles en la zona baja y reducir las descargas de aguas residuales domésticas, fomentado sistemas de reciclaje de aguas residuales domésticas.

Referencias

- [1] Calvo, G. (2015). Ríos: Fundamentos sobre su Calidad y la Relación con el Entorno Socioambiental. San José, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- [2] MINAE (1997). Decreto Ejecutivo N° 25721-MINAE. "Ley Forestal". Publicado en La Gaceta Oficial n° 16, Jueves 23 de enero de 1997. San José, Costa Rica.
- [3] MINAE (2002). Resolución N 5666-2002. Recuperado de http://www.merlink.co.cr:8084/search/EP_SEJ_EXA257.jsp?cartelNo=20150400160&cartelSeq=00&cartelCate=1&bidocUnikey=D20150421131716135114296438369160&reAdjuCnt=0
- [4] Göransson, G., Norrman, J., and Larson, M. (2018). Contaminated landslide runoff deposits in rivers: Method for estimating long-term ecological risks. *Science of The Total Environment*, Volume 642, pp 553-566. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.078>.
- [5] Mora, E. (2014). Asignan casas a beneficiarios de proyecto El Tablazo en Acosta. *El Jornal*. Recuperado de <http://eljornalcr.com/asignan-casas-a-beneficiarios-de-proyecto-el-tablazo-en-acosta/>

- [6] IMN (2011). Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica: Cuenca del río Parrita. Recuperado de http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/cuenca_rio_parrita_1.pdf
- [7] Hu, Y., Yang-Liu, C. and Chen T. (2017). Ecological improvement and community participation: lessons from Xiaoqing River Ecological Improvement Project in Jinan, China. *Community Development Journal* 52(1):21-37. DOI: [10.1093/cdj/bsw049](https://doi.org/10.1093/cdj/bsw049)
- [8] Calvo-Brenes, G. (2018). Índices e indicadores sobre la calidad del agua, 1th ed. Cartago, Costa Rica, ET. ISBN 978-9977-66-454-5.
- [9] MINAE (2007). Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales, La Gaceta, no. 33903-MINAE-S, 2007.
- [10] Calvo-Brenes, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32 (4), p 104-115
- [11] Ortiz, E. (2014). Atlas digital de Costa Rica 2008. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal.
- [12] APHA, AWWA and AEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 23rd ed. WA, DC, USA, 2017.
- [13] Dojlido, J., Raniszewski, j., and Woyciechowska, J. (1994). Water quality index applied to rivers in the vistula river basin in Poland. *Environmental monitoring and assessment*, vol. 33, pp. 33-42.
- [14] Landwehr, J. (1974). Water quality indices: construction and analysis. Tesis doctoral. University of Michigan, United States of America.
- [15] Ferreira, A. (2015). Respuestas poblacionales de macroinvertebrados a distintas calidades de agua en cuerpos loticos de la llanura pampeana. (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/44807>
- [16] Perevochtchikova, M., Aponte, N., Zamudio, V., y G, Sandoval, (2016). Monitoreo comunitario participativo de la calidad del agua: caso Ajusco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(6), 5-23.
- [17] Lancaster, J. (2008). Movement and dispersion of insects of stream channels: What role does flow play? En Lancaster, J., y Briers, R. (Eds.). *Aquatic Insects: Challenges to Populations* (p.139-157). North American, Editorial CABI.
- [18] Salazar-Céspedes, K. (2018). Estrategia de Monitoreo Hídrico Comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua. Tesis de grado. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.