



**TECNOLOGÍA**  
*en marcha*

Revista trimestral  
Julio – Setiembre 2020  
Volumen 33 N° 3  
ISSN-E 2215-3241



**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos

latindex

Dialnet  
DOAJ

SciELO

REDIB  
Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico

**Comisión Editorial**

Ana Ruth Vilchez Rodriguez. Directora.  
Instituto Tecnológico 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**

Asesoría en Ediciones gráficas

**Diseño de cubierta**

Felipe Abarca Fedullo

**Datos de catalogación en publicación**

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica  
de Costa Rica. - Vol. 33-3, Julio-Setiembre  
(2020) -Cartago: la Editorial, 2020 -  
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: editorial.tec.ac.cr  
[http://revistas.tec.ac.cr/tec\\_marcha](http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha)



Editorial Tecnológica  
de Costa Rica

**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**

[www.latindex.unam.mx](http://www.latindex.unam.mx)



[dialnet.unirioja.es](http://dialnet.unirioja.es)



<http://www.doaj.org/>



<http://www.scielo.org/>



Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico  
<https://redib.org>



# **TECNOLOGÍA** *en marcha*

## Contenido

Evaluation of an Automated Testing Framework: A Case Study Evaluación del Framework de Pruebas Automáticas: Un Caso de Estudio <i>Abel Méndez-Porras, Jorge Alfaro-Velasco, Alexandra Martínez.....</i>	3
Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica Evaluation of planting density and level of fertilization in rice, for the varieties Palmar-18, Lazarroz FL and NayuribeB FL, in Parrita (central Pacific), Costa Rica <i>Juan Gabriel Arias-Badilla, Edwin Antonio Esquivel-Segura, Roel Campos-Rodríguez.....</i>	13
Identificación de explosivos Orgánicos en Indicios Post-Explosión mediante GC-MS y GC-NPD Identification of Organic Explosives Clues Post-Explosion by GC-MS And GC-NPD Methods <i>Stephanie Arce-Rubí, Steven Vargas-Ramírez, Efraín Solís-Montiel, Gilberto Piedra-Marín, Jose Carlos Mora-Barrantes, José Pablo Sibaja-Brenes, Henry Borbón-Alpizar.....</i>	25
Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos Indirect methodology for life-span estimation of power transformers from the evaluation of its dielectric materials <i>Luis Diego Acuña-Barrantes, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez.....</i>	45
Efecto de la aplicación de aire caliente humidificado como tecnología poscosecha en la calidad de la Feijoa Effect of application of hot air humidified as post-harvest technology in the quality of Feijoa <i>David Leopoldo Sánchez-Rubio, Jhon Harrison Pérez-Benavides, Claudia Patricia Pérez-Rodríguez .....</i>	57

**Techos verdes: una estrategia sustentable**

**Green Roofs: a sustainable strategy**

*Brenda Guadalupe López-González, Alejandro D. Camacho,  
María Concepción Martínez-Rodríguez, Mariana Marcelino-Aranda* ..... 68

**Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica**

**Secondary metabolites with medicinal activity extracted from fungi found in Central America**

*Luis Felipe Arce-Torres, Isabella Gómez-Díaz, Mariana Monge-Artavia,  
Joselyn Prado-Cordero*..... 80

**Construcción de una mesa de succión de doble capa de bajo costo para definir macroporosidad (porosidad drenable) y microporosidad**

**Construction of a low-cost suction table to define macroporosity (drainable porosity) and microporosity**

*Adrián Enrique Chavarría-Vidal, Jarbas Honorio de Miranda,  
Asdrubal Farias-Ramírez*..... 90

**Desarrollo de un enjuague bucal natural a partir de extractos de zingiberáceas orgánicas disponibles en Costa Rica**

**Development of a natural mouthwash from organic Zingiberaceas extracts available in Costa Rica**

*Bernardo Soto-Calvo, Edurne Mendaza-Lainez, Irene Varela-Rojas*..... 98

**Determinación de los principales factores que influyen en las lesiones músculo esqueléticas de los trabajadores del Mercado Central de Cartago, Costa Rica**

**Factors that influence in musculoskeletal injuries in the premises of the Central Market of Cartago, Costa Rica**

*Ara Villalobos Rodríguez, Miriam Brenes-Cerdas* ..... 105

**Determinación de la actividad biocida de extractos vegetales para el combate de la mosca blanca Bemisia tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae)**

**Determination of the biocidal activity of plant extracts against the whitefly Bemisia tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae)**

*Lucía Rodríguez-Montero, Alexander Berrocal-Jiménez, Roel Campos-Rodríguez ,  
Mairon Madriz-Martínez* ..... 117

# Evaluation of an Automated Testing *Framework*: A Case Study

## Evaluación del *Framework* de Pruebas Automáticas: Un Caso de Estudio

Abel Méndez-Porras<sup>1</sup>, Jorge Alfaro-Velasco<sup>2</sup>, Alexandra Martínez<sup>3</sup>

---

Méndez-Porras, A; Alfaro-Velasco, J; Martínez, A. Evaluation of an Automated Testing *Framework*: A Case Study. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 3-12.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4372>



1 Costa Rica Institute of Technology. Computer Department. Costa Rica. E-mail: amendez@tec.ac.cr

2 Costa Rica Institute of Technology. Computer Department. Costa Rica. E-mail: joalfaro@tec.ac.cr

3 University of Costa Rica. Computer and Information Science Department. Costa Rica. E-mail: alexandra.martinez@ecci.ucr.ac.cr

## Keywords

Software quality assurance; automated software testing; mobile applications; SURF; user-interaction features; software engineering.

## Abstract

Developing mobile applications without defects or in a minimum number is an important challenge for programmers and quality assurance teams. Automated software test can be the key to improve the traditional manual testing, often time consuming and repetitive. Mobile applications support user-interaction characteristics, which are independent from the application logic. They include content presentation or navigation features, such as scroll or zoom into screens, and a rotating device.

In this paper, an automated testing framework is proposed and evaluated. This framework integrates user- interaction features, historical bug information, and an interest points detector and descriptor to identify new bugs. It has shown that it works well detecting bugs associated with user-interactions.

## Palabras clave

Aseguramiento de la calidad del software; pruebas automatizadas de software; aplicaciones móviles; SURF; interacciones del usuario; ingeniería de software.

## Resumen

El desarrollo de aplicaciones móviles sin defectos o con un número mínimo es un desafío importante para los programadores y los equipos de control de calidad. Las pruebas automatizadas de software pueden ser la clave para mejorar las pruebas de software manuales tradicionales, que a menudo requieren mucho tiempo y son repetitivas. Las aplicaciones móviles soportan funciones de interacción con el usuario, que son independientes de la lógica de la aplicación; entre ellas se incluyen funciones de presentación de contenido o navegación, rotación del dispositivo como desplazamiento, aumento o disminución de las pantallas.

En este documento, se propone y evalúa una herramienta de pruebas de software automatizada. La herramienta integra funciones de interacción con el usuario, información histórica de defectos y un detector y descriptor de puntos de interés para identificar nuevos defectos.

La herramienta demostró que funciona bien detectando defectos relacionados con las interacciones con el usuario.

## Introduction

Capabilities of mobile devices, such as CPU (Central Processing Unit) computation, memory, RAM (Random Access Memory) size, and many more have been improved. In few years these devices have increasingly replaced traditional computers [20]. Mobile applications are very popular and play a strategic role in the activities of society. The devices that run Android applications are the largest majority, currently corresponding to 85% of the devices sold worldwide [19].

The quality of mobile applications is lower than expected due to rapid development processes, where the activity of software testing is neglected or carried out in a superficial way [2]. Zaeem

[24] conducted a bug study on 106 bugs drawn from 13 open-source Android applications. Hu [11] conducted a bug mining study from 10 Android applications and he reported 168 bugs. For the trial work to which this article refers, a bug study from 38 open-source Android applications was conducted, and 79 bugs were reported.

There is a wide variety of mobile devices and versions of operating systems, known as fragmentation [10], [12], [13], [14]. Fragmentation represents a testing difficulty since mobile applications may behave differently regarding usability and performance, depending on the device they are run on. According to Muccini *et al.* [17], the main challenges of testing mobile applications are related to their contextual and mobile nature.

Manual testing is the main technique used for testing graphical user interfaces of mobile apps. Manual testing is often tedious and error-prone [8]. Mobile applications are small (code size), are event-centric, and have a simple and intuitive GUI (Graphical User Interface). According to Yang *et al.* [23], these characteristics make them suitable for specific automated testing techniques.

In order to obtain higher quality mobile applications, greater attention should be devoted to testing throughout the development process, and effective models, methods, techniques, and tools for testing should be available for testers [2]. Automation can play a strategic role in ensuring the quality of mobile applications.

Developing mobile applications without defects or with the minimum number of defects is an important challenge for programmers and quality assurance teams. As the testing process is often tedious, test automation can be the key to alleviating such heavy activities [20].

In the literature several approaches to address the automated testing in mobile applications can be found. AMOGA [20] is a strategy that uses a hybrid, static-dynamic approach for generating a user interface model from mobile apps for model-based testing. GATS [7] is a tool that uses finite-state machine to learn a model of the app during testing; then it uses the learned model to generate user inputs or system events to visit the rest states of the app, and at last, it uses the result of the input to refine the model. Virtual Test Engineer [3] has been developed to convert the UML (Unified Modeling Language) sequence diagram into Android APK (Android Application Package) to test Android mobile applications. A model-based test generation methodology has been proposed to evaluate the impact of the interaction of the environment, the wireless network, and the app configurations on the performance of a mobile streaming app and thereby, on the experience of the end user [1].

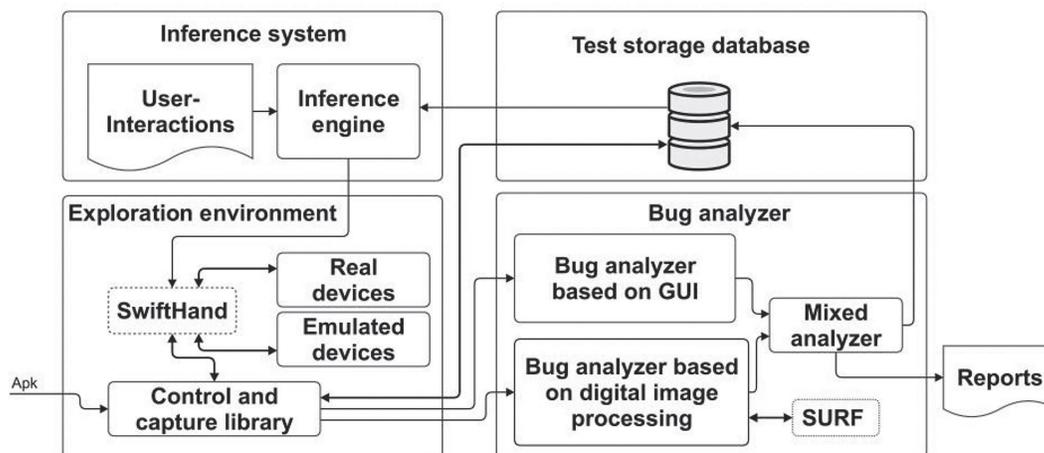
The research described here aimed to propose an automated testing framework for mobile applications based on user-interaction features and historical bug information. A user-interaction feature is an action supported by the mobile platform and associated to content presentation or navigation. This action is independent of the application's logic [24].

The framework proposed is organized in four components: an exploration environment, an inference engine, a bug analyzer, and a test storage database. A case study was conducted to evaluate the effectiveness of the automated testing framework.

The following are the research contributions: First, digital image processing and GUI information were combined in a new way to find bugs in mobile applications generated by user-interaction features; second, based on historical bug information, the selection of sequences of events to be used as test cases was improved, and third, the proposed framework was evaluated through a case study.

## Automated testing framework

Designing an automated testing framework that can identify bugs related to user-interaction features requires resolving four main challenges: the automated exploration of mobile applications, the automated introduction of user-interaction features during the automated exploration, the automated analysis of bug identification, and the storage and use of historical bug information to improve bug detection. An overview of the automated testing framework for mobile applications based on user-interaction features and historical bug information [15], [16] is shown in figure 1. Each of the components of the proposed framework are represented here.



**Figure 1.** Automated testing framework components

### A. Exploration Environment

Automated exploration is one of the more complex tasks in the automated testing of mobile applications. The decision of which method to use for automated exploratory events within applications will have a direct effect on the results obtained. The exploration environment launches an application using the APK file. After starting the application, the exploration environment navigates through the application's different screens. The aim is to achieve the widest possible branch coverage of the application (quantity of screens visited, and events executed).

The exploration environment is responsible for creating a model of the application. This model is then used to explore the application automatically. For this task, the tool SwiftHand [8] was used. This tool uses learning-based testing to explore the application and creates a model. To fulfill this task SwiftHand was modified to allow the inclusion of user-interaction features while it explored the application model. The function of capturing images before and after the execution of the user-interaction features was added; these images were sent to the bug analyzer to find potential bugs in the application. Additionally, the function of capturing GUI information was enabled before and after the execution of the user-interaction features, to be also sent to the bug analyzer to find potential bugs.

### B. Inference Engine

The simplest way to introduce user-interaction features while an application is being automated explored is using a random technique. However, this technique can conduct analysis in

application states under testing that have little relevance in relation to the appearance of bugs. More information is needed in regard to when is the best time to automate the introduction of the user-interaction features to best take advantage of the automated exploration of the applications.

In the inference engine, two strategies were implemented:

- Random.— The modified Swifthand device was run, and while automatically exploring the application, user-interaction features were randomly introduced.
- Frequency of bugs by widget.— Widgets were identified in the current activity (window) of the application, and the historical information of bugs was analyzed to find out if these widgets had presented major bugs and which user-interaction features had been associated with these bugs. If these types of widgets had presented bugs in other applications, the inference engine introduced the same user interaction features that reported the bugs determined to find bugs associated with the same widgets in the new applications.

### C. Bug Analyzer

All the user interaction features treated have an oracle; it allows to know which the desired result is as an user-interaction is introduced in the application under testing. In this part of the research, a bug analyzer based on digital image processing was implemented, as well as another one based on GUI information. Finally, a technique to combine the results of these two analyses was applied in order to obtain greater precision in the detection of bugs associated with user-interaction features.

Bugs analysis can be described as follows:

The bug analyzer receives a set of image pairs and GUI information from the inference engine. These images and GUI information are captured before and after the introduction of each user-interaction feature. The interest points detector and descriptor (SURF) [4] finds interest points in each image. A comparison among interest points found in the images results in a percentage of similarity. If the percentage of similarity is lower than a set threshold, it is a possible indicator of a bug. GUI information is used then to identify widgets that generated the bug. If widget's properties have changed after the introduction of the user interaction feature, that is a possible indication of a bug as well. Interest points and GUI information are used to determine whether bugs were produced by the user interaction feature. If bugs are found, information about is stored in the repository of historical bug information.

The different interest points obtained from the analysis done with SURF contain coordinates. Given that the images examined for analyzing the effectiveness of the user-interaction feature have exactly the same resolution as the size of the screen of the mobile device or emulator used while exploring the app, these coordinates can serve to locate the widget that is apparently showing a bug exactly in the user interface layout.

To do this the absolute coordinates of each widget and the properties of width and height of each one are determined using the GUI structure of the application. Knowing this data, widgets can be exactly located in the screen; in the same way, the exact amount of interest points in the area of each widget can be determined. The technician decides then if the amount of these is high enough to consider that the widget might be showing a bug.

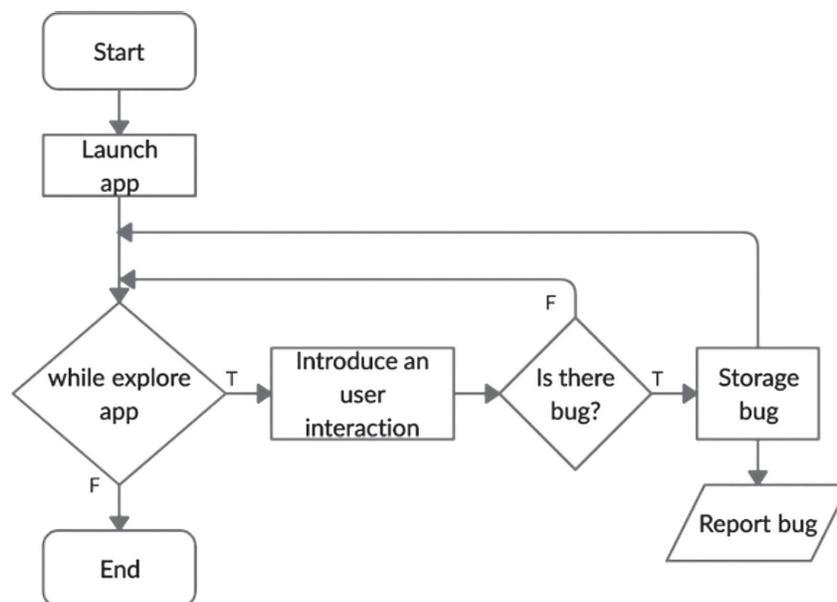
On the other hand, in most cases, it is perfectly recognizable when a widget is showing a bug by obtaining and comparing its properties before and after the user-interactions are processed. Since the absolute coordinates of each widget have been previously determined, they can be used to confirm that the widget considered bugged is indeed a widget that is showing some kind of bug.

#### D. Test storage database

This database stores all the test cases created by user interactions and all historical bug information. Information about the event sequences and user interactions is stored in the database. Also, GUI information obtained before and after each user-interaction introduced is stored in the database.

#### E. Flowchart of the automated testing framework

Figure 2 shows the flowchart of the Automated Testing Framework. The Application Explorer launches the application to be tested in the actual devices or emulated devices. It launches the application using the (.apk) file. After starting the application, it navigates through the application's different screens. The Inference Engine inserts user interaction features while the application is explored automatically. The Analyzer receives a set of image pairs and GUI information from the Inference Engine. Images and GUI information are captured before and after the introduction of each user interaction feature. If bugs are found, information about the bugs is stored in the repository of historical bug information.



**Figure 2.** Flowchart of the application test and bug detection

#### Evaluation of the automated testing framework

In this research, the goal was to evaluate the complete platform of Automated Testing Framework on its efficacy to find bugs. That meant probing its functions all the way through each component: the exploration environment, the inference engine, the bug analyzer, and test storage database.

A confusion matrix is a simple but effective way to visualize the successes and the errors that a classifier has made. Metrics based on the confusion matrix [6] such as accuracy [21], precision [18], recall [18], and F measure [5] were selected to evaluate the bug analyzer.

The amongsthesior-The evaluation of the framework proposed consisted of two phases. In the first phase, bugs derived from user-interaction features were detected using automated testing. In the second phase, a statistical comparison between manual and automatic testing was conducted.

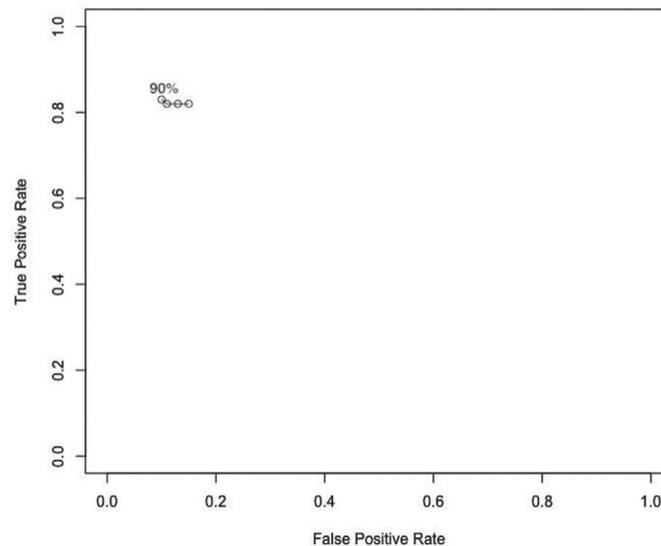
#### A. Double rotation test for 20 minutes within 51 mobile applications

For the test, 100 mobile applications were randomly selected from the F-Droid catalog. They were tested in the SwiftHand tool to probe if it could launch and explore them automatically. Of the 100 applications selected, the SwiftHand tool managed to launch and automatically explore 51 mobile applications. These 51 applications were those used in this study.

A confusion matrix was created by comparing the bugs reported by automated testing based on SURF and the bugs checked by manual testing. They were compared using four different similarity thresholds. Table 1 shows the four thresholds in similarity percentages (column 1): the true positive (column 2), the false positive (column 3), the true negative (column 4), and the false negative (column 5).

Four metrics were applied: accuracy (column 6), recall (column 7), precision (column 8), and F measure (column 9).

As it can be seen from table 1, the bug analyzer proven (classifier) offers better overall results (in terms of the F measure) when the threshold is set at 90 similarity percent. This is also evident from figure 3, where the closest point to the (0,1) perfect classifier corresponds to the 90 percent thresholds. Figure 3 shows the ROC curve of our bug analyzer, when varying the similarity percentage threshold in this case study.



**Figure 3.** ROC curve described by the classifier in case test 3, when varying the similarity threshold (as in table 1)

It is noticeable in this figure that the bug analyzer performed right in terms of proximity to the (0,1) corner, and described a smooth curve, which means that the classifier did not show abrupt changes in behavior when varying the threshold. The false negative is less than 4% of the sample data and the false positive is less than 12% of the sample data; that explains why the points on the ROC curve are so close.

**Table 1.** Confusion matrix obtained from case study 3, using four different similarity thresholds

Threshold	TP	FP	TN	FN	Accuracy	Recall	Precision	F
90.0	351	155	1467	74	0.89	0.83	0.69	0.75
92.5	352	181	1438	76	0.87	0.82	0.66	0.73
95.0	354	213	1400	80	0.86	0.82	0.62	0.71
97.5	359	234	1273	81	0.80	0.82	0.61	0.70

### Statistical comparison between manual and automated testing

The main purpose in this research was to understand whether there was a significant difference or not in the number of bugs reported under two different testing techniques, automated and manual (see table 2). The independent variable was the *testing technique* and the dependent variable was the *number of bugs*. The object of experimentation was *the mobile application running on an specific device*. The null hypothesis was that the number of bugs identified by means of the automated testing technique were the same as the bugs identified by means of the manual testing technique. The alternative hypothesis was that they were not.

The dependent variable consisted in related bugs groups. The dependent variable was measured at a continuous level (specifically ratio).. Related groups indicate that the same objects are present in both groups. Each object has been measured on two occasions on the same dependent variable. The objects, “the mobile applications running on specific device”, were tested using “automated testing” and “manual testing”.

The SURF descriptor and detector threshold was fixed at 92.5% of similarity, based on the findings obtained in the case studies.

A hypothesis test for matched or paired samples is used when two samples are drawn from the same set of objects [9]. It is recommended to use the paired t-test when two samples resulting from repeated measures are compared [22].

A Shapiro-Wilk normality test was applied to conclude whether the data were normally distributed or not. The  $p$ -value obtained was 0,01384; therefore, the assumption of normality was rejected.

In a homogeneity of variance test, the null hypothesis states that the difference in mean is equal to 0 and the alternative hypothesis states that the difference in mean is not equal to zero.

There was not normality in the data; for that reason, a parametric test couldn't be applied. Hence, a non-parametric test was chosen: the Wilcoxon Signed-Rank test, which is used to compare two sets of scores that come from the same participants. This occurred within the data because mobile applications were subjected to more than one condition (automated and manual testing). The assumptions of the Wilcoxon SignedRank test are that data are paired and come from the same sample; each pair is chosen randomly and independently, and the data are measured on at least an interval scale.

Since  $p$ -value was 0,0092 for the alternative hypothesis (“greater”), and was less than the 0,05 significance level, the null hypothesis was rejected. From the sample data there was sufficient evidence to conclude that bug measurement using the automated framework is, on average, more effective than measurement using manual testing (within a 5% level of significance).

**Table 2.** Manual testing versus automatic testing

Name	Manual		Automatic	
	User-Interactions	Bugs	User-Interactions	Bugs
An.stop.10	13	3	39	12
android.androidVNC.13	6	5	41	0
byrne.utilities.converter.1	7	4	46	23
ch.fixme.cowsay.5	6	1	42	11
com.anoshenko.android.mahjongg.14	7	4	37	0
com.ath0.rpn.17	5	0	43	0
com.chmod0.manpages.3qqqq	8	5	42	24
com.drismo.17	6	0	39	0
com.gcstar.scanner.1	5	5	40	29
com.ginkel.hashit.25	5	2	44	3
dk.andsen.asqlitemanager.17	7	4	44	17
nindroid	6	0	41	0
org.jessies.mathdroid.293	5	0	42	23
org.projectmaxs.main.2000100151	6	2	41	19
trolly	5	2	39	1
Total	97	37	620	162

## Conclusions and future work

The behavior of mobile applications is affected by different types of user events: events produced through GUI, events generated by the device hardware platform, events from the Internet, and events of mobile phones. These types of events are likely to generate bugs in mobile

applications. The periodicity with which user events are triggered and the variety of events make the process of automatic software testing in mobile applications difficult.

Use of historical bug information to find bugs in mobile applications is complex because it requires storing information about all the bugs detected each time that other applications are tested. The first difficulty is knowing when there is enough information to infer when to enter a user interaction during the testing process. The second difficulty is that it is necessary to obtain applications that are being developed and have not yet been tested to increase the probability of storing bugs associated with user interaction features.

A top-down technique was used to design the automated testing framework. The advantage of using this technique was that, through a formal process, the architecture of framework was designed to foster further research progress. This architecture was organized into four components: an exploration environment, an inference system, a bug analyzer, and a test storage database.

Evaluation of the automated framework showed that it works well detecting bugs associated with user-interactions, on average, better than manual testing (within a 5% level of significance). In addition, it has the advantage of reporting the similarity percentage of the window before and

after executing a user-interaction. It also shows the original images of the window before and after the user-interaction is executed. Finally, can see the images where the differences between the window before and after the execution of the user-interaction are highlighted.

There are defects associated with user-interactions in mobile applications that reduce their usability, although they do not cause the application to crash. For example, there is an open dialog in the window for the user to select an option, but when an interaction is executed, the dialog closes, and the user must re-select the action so that the dialog is shown again. In this case, the application has not stopped but has generated an additional task for the user. Obviously, reducing this type of bug in applications will allow them to offer better usability and be more user-friendly.

As conductors of this study, we plans to develop our own exploration environment because we need more control over the event-sequences automatically entered in the applications under test. Also, we would like to improve the exploration coverage in each application under test.

## References

- [1] M. Al-Tekreeti, K. Naik, A. Abdrabou, M. Zaman, and P. Srivastava, "A methodology for generating tests for evaluating user-centric performance of mobile streaming applications." *Communications in Computer and Information Science*, 991: 406–429, 2019.
- [2] D. Amalfitano, A.R. Fasolino, and P. Tramontana, "A gui crawling-based technique for android mobile application testing," in *Proceedings - 4th IEEE International Conference on Software Testing, Verification, and Validation Workshops, ICSTW, 2011*, pages 252–261.
- [3] R. Anbunathan and A. Basu, "Automation framework for test script generation for android mobile," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 731: 571–584, 2019.
- [4] H. Bay, T. Tuytelaars, and L Van Gool. "Surf: Speeded up robust features," in *Computer Vision - ECCV*, vol. 3951, pages 404–417, 2006.
- [5] C. Cagatay, "Performance evaluation metrics for software fault prediction studies," 9 01 2012.
- [6] N.V. Chawla, "Data mining for imbalanced datasets: An overview," in *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Boston, MA: Springer, pages 853–867, 2017.
- [7] T. Chen, T. Song, S. He, and A. Liang, "A gui-based automated test system for android applications," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 760: 517–524, 2019.
- [8] W. Choi, G. Necula, and K. Sen, "Guided gui testing of android apps with minimal restart and approximate learning," *ACM SIGPLAN Notices*, 48(10): 623–639, 2013.
- [9] S. Dean and B. Illowsky, *Collaborative Statistics*. Houston, Texas: Rice University, , 2012.
- [10] H.K. Ham and Y.B. Park. "Mobile application compatibility test system design for android fragmentation," *Communications in Computer and In-formation Science*, 257 CCIS: 314–320, 2011.
- [11] C. Hu and I. Neamtiu, Automating gui testing for android applications," in *Proceedings - International Conference on Software Engineering, 2011*, pages 77–83.
- [12] J. Kaasila, D. Ferreira, V. Kostakos, and T. Ojala, "Testdroid: Automated remote gui testing on android," in *Proceedings of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM 2012*.

# Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica

Evaluation of planting density and level of fertilization in rice, for the varieties Palmar-18, Lazarroz FL and NayuribeB FL, in Parrita (central Pacific), Costa Rica

Juan Gabriel Arias-Badilla<sup>1</sup>, Edwin Antonio Esquivel-Segura<sup>2</sup>,  
Roel Campos-Rodríguez<sup>3</sup>

Arias-Badilla, J; Esquivel-Segura, E; Campos-Rodríguez, R. Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 13-24.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4363>



- 1 Estudiante de maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: Juan\_AB17@hotmail.com
- 2 Doctor en Ciencias Forestales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: eesquivel@tec.ac.cr  <https://orcid.org/0000-0001-9553-060X>
- 3 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Coordinador del Área Académica Agroforestal. Escuela de Agronegocios, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr  <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>

## Palabras clave

*Oryza sativa* L.; fertilización con NPK; nutrición; rendimiento; arroz en seco.

## Resumen

Los materiales liberados en Costa Rica a la fecha para el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) no reciben una distinción en el manejo por parte de los productores del Pacífico Central y Zona Sur de Costa Rica, a pesar de la alta variabilidad del nivel de macollamiento y de la capacidad productiva. Para determinar el efecto de diferentes densidades de siembra y diferentes niveles de fertilización sobre el rendimiento de arroz, se realizó un ensayo en finca La Ligia, en Parrita, Puntarenas. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tratamientos y tres repeticiones para cada una de las variedades (Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL); los tratamientos consistieron en tres densidades de siembra (75, 115 y 155 kg/ha de semilla) y 3 niveles de fertilización de N-P-K (50-50-50, 100-50-0, 100-50-100 kg/ha). Las variables evaluadas fueron rendimiento (ton/ha SL), número de macollos / planta, número de panículas / m<sup>2</sup>, cantidad de granos llenos y peso de 1000 granos; todo lo anterior evaluado en la cosecha del I ciclo de seco correspondiente al año 2017. Para todos los tratamientos se encontraron respuestas significativas. La densidad de siembra de 3,37 qq / ha de semilla favoreció los mejores rendimientos para todas las variedades. Estas además mostraron mejor rendimiento luego de suministrar 100-50-100 kg/ha de fertilizante, y Lazarroz FL fue la variedad que alcanzó los mejores rendimientos (ton/ha SL), seguida de NayuribeB FL y de Palmar 18.

## Keywords

*Oryza sativa* L.; fertilization with NPK; nutrition; yield; rice in dry land.

## Abstract

The materials released in Costa Rica for rice cultivation (*Oryza sativa* L.) to date do not receive a differentiated management from producers of the central Pacific and south zone of Costa Rica, despite the high variability in the level of tillering and the productive capacity. To determine the effect of different sowing densities and different levels of fertilization on the yield of rice (*Oryza sativa* L.) an assay was carried out in the farm La Ligia, which is owned by the company DAPASA, in Parrita, Puntarenas. The experimental design was randomized, of complete blocks with nine treatments and three repetitions, one for each of the varieties (Palmar 18, Lazarroz FL and NayuribeB FL). The treatments compared three planting densities (75, 115, and 155 k seed / ha) and 3 fertilization levels of N-P-K (50-50-50, 100-50-0, 100-50-100 kg / ha). The variables evaluated were yield (ton / ha SL), number of tillers / plants, number of panicles / m<sup>2</sup>, number of full grains, and weight of 1000 grains, all of them evaluated in the harvest of the 1st dry season in year 2017. For all treatments, significant findings were achieved. Planting density of 155 kg seed / ha allowed the best yields for the three varieties. Crop yield in every variety was improved after 100-50-100 kg fertilizer / ha was supplied. Lazarroz FL yielded at highest rates (ton / ha SL), followed by NayuribeB FL and Palmar 18.

## Introducción

Costa Rica dentro de sus políticas sociales ha buscado combatir la pobreza, presente en mayor medida en áreas rurales y fronterizas [1]. Un pilar fundamental en la alimentación de esta población es el arroz.

Para el año 2014, en el Censo Agropecuario se reportaron más de 58 000 hectáreas plantadas de arroz, de las cuales solo se cosecharon poco más de 52 000 hectáreas [2]. El promedio nacional de producción en el periodo 2016-2017 fue de 4,32 toneladas por hectárea; comparativamente, Argentina obtuvo un promedio de 6,66 toneladas por hectárea. Esto obligó al sector arrocero a continuar trabajando en el mejoramiento de variedades y a ser más eficiente en el uso de los insumos y recursos con el fin de generar un menor impacto ambiental [3].

Uno de los aspectos básicos a tomar en cuenta en el cultivo del arroz es la densidad de siembra. Algunas investigaciones sugieren que las densidades más apropiadas para el cultivo de arroz pueden rondar alrededor de los 2,0 a los 2,5 quintales de semilla por hectárea [4].

Las variedades utilizadas en el país difieren en expresión, comportamiento, desarrollo y producción de las variedades tradicionalmente sembradas. La Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ) señala que la principal variedad sembrada en el país es Palmar 18, y que variedades más recientes como Lazarroz FL y NayuribeB FL han tomado importancia, ya que para el periodo 2015-2016 se sembraron más de 4000 hectáreas [5].

La fertilización y nutrición en el cultivo de arroz es un tema ampliamente abarcado. En Costa Rica uno de los principales problemas que existen es el análisis de la nutrición vegetal de forma aislada del entorno productivo, por parte del encargado o dueño de la finca. La rentabilidad del productor en el negocio está en función de la capacidad de poder suministrar los insumos adecuados, en el momento más oportuno y bajo el esquema de gastos mínimos y máxima eficiencia. De lo contrario se estaría promoviendo un bajo rendimiento con un alto costo; esta baja rentabilidad podría atentar contra la permanencia del productor en la actividad arrocera. Las recomendaciones de fertilización se basan en rangos de 100 kg de N, 40 a 60 kg de P y 80 a 90 kg de K [6].

Debido a la inexistencia de planes de fertilización específicos actualmente para cada variedad, para el año 2030 la frontera agrícola mundial se habrá expandido en 19 millones de hectáreas, en su mayoría tierras de labranza en secano, por lo que los productores requerirán de un mayor conocimiento de sus variedades [7].

Por la razón indicada, la investigación que aquí se presenta se propuso encontrar la mejor combinación entre fertilización y densidades de siembra para las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, con el fin de alcanzar la mayor productividad del cultivo mediante un plan de manejo.

## Metodología

La investigación se desarrolló en condiciones de secano, en la finca La Ligia, Parrita, a una altura de 75 m.s.n.m. [8]. El sitio se ubica dentro de una zona de vida de bosque húmedo tropical. La clasificación del tipo de suelo es Haplic Gleysol del orden Entisol, suborden Orthents [9].

De acuerdo con los datos agroclimáticos históricos de los últimos veinte años en finca La Ligia, la zona Pacífico central cuenta con condiciones favorables para el cultivo de arroz en secano.

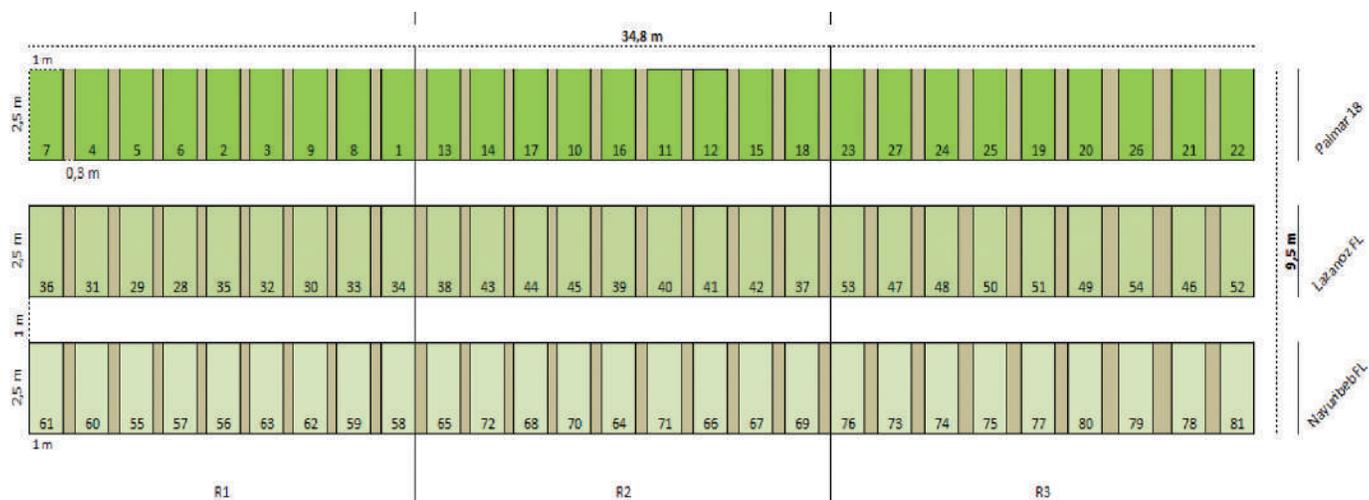
En esta investigación se evaluó el comportamiento de las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL frente a la interacción entre tres densidades de siembra y tres niveles de fertilización (cuadro 1), la cual se concretó en 9 tratamientos con 3 repeticiones, para alcanzar 27 unidades experimentales por cada variedad evaluada; el ensayo en total estuvo conformado por 81 unidades experimentales.

Cada parcela contó con un área de 2,5 m<sup>2</sup> de modo que las parcelas estaban separadas entre sí por una franja sin cultivar de 30 cm con el fin de evitar la interferencia entre tratamientos. El área total del ensayo fue de 423,2 m<sup>2</sup>.

La densidad de siembra se estableció en el momento de sembrar (figura 1) y el nivel de fertilización se adecuó a cada tratamiento en los primeros 35 días después de la siembra. Los tratamientos de fertilización (nitrógeno-fósforo-potasio) se practicaron así: en el caso del nivel 50-50-50, se agregó todo el nitrógeno en el momento de la siembra; en el caso del tratamiento 100-50-0 se agregó el 20% del nitrógeno en el momento de la siembra y el 80% restante, entre los 15 y los 35 días después de la siembra; en el caso del tratamiento 100-50-100, se agregó un 20% en el momento de la siembra, se adicionó un 30% a los 8 días de haber sembrado y se agregó el restante 50% entre los primeros 15 y 35 días (cuadro 1). Para los tres modalidades de tratamiento, el fósforo y el potasio totales se incorporaron en el momento de la siembra con el fin de aumentar el aprovechamiento y disponibilidad de los nutrientes, disminuyendo así las pérdidas por volatilización en el caso del nitrógeno (cuadro 2).

**Cuadro 1.** Descripción de los tratamientos del ensayo, finca La Ligia, Parrita, 2017

Tratamiento	Densidad de siembra (qq/ha)	Dosis de fertilizante (kg/ha)		
		N	P	K
1	1,60	50	50	50
2	1,60	100	50	0
3	1,60	100	50	100
4	2,50	50	50	50
5	2,50	100	50	0
6	2,50	100	50	100
7	3,37	50	50	50
8	3,37	100	50	0
9	3,37	100	50	100



**Figura 1.** Distribución de bloques al azar, de los tratamientos en el campo (La Ligia, Parrita, 2017)

**Cuadro 2.** Programa de fertilización de acuerdo con la edad fisiológica de la planta, la fórmula empleada y el momento de aplicación (La Ligua, Parrita, 2017)

Fecha	dds*	Tratamiento	Aplicación de la fórmula			Aporte elemento (kg/ha)					
			Fórmula	Cantidad (qq/ha)*	Cantidad (kg/ha)	N*	P	K	Mg	S	B
11/7/2017	0	50-50-50	26-0-26	1,00	46,00	12,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0
11/7/2017	0	50-50-50	18-46-0	2,37	109,02	19,6	50,1	0,0	0,0	0,0	0,0
11/7/2017	0	50-50-50	KCl 60%	1,37	63,02	0,0	0,0	37,8	0,0	0,0	0,0
11/7/2017	0	50-50-50	Urea 40%+7,7(S)	1,00	46,00	18,4	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0
11/7/2017	0	100-50-0	18-46-0	2,37	109,02	19,6	50,1	0,0	0,0	0,0	0,0
26/7/2017	15	100-50-0	Urea 40%+7,7(S)	2,00	92,00	36,8	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0
15/8/2017	35	100-50-0	Urea 40%+7,7(S)	2,35	108,10	43,2	0,0	0,0	0,0	8,3	1,0
11/7/2017	0	100-50-100	18-46-0	2,36	108,56	19,5	49,9	0,0	0,0	0,0	0,0
11/7/2017	0	100-50-100	KCl 60%	2,50	115,00	0,0	0,0	69,0	0,0	0,0	0,0
19/7/2017	8	100-50-100	26-0-26	2,60	119,60	31,1	0,0	31,1	0,0	0,0	0,0
26/7/2017	15	100-50-100	Urea 40%+7,7(S)	1,00	46,00	18,4	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0
15/8/2017	35	100-50-100	Urea 40%+7,7(S)	1,70	78,20	31,3	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0

\* dds: días después de siembra, qq: quintales (1 quintal = 46 kg)

El manejo nutricional de los tratamientos estuvo dirigido a cubrir las necesidades tempranas del cultivo y a potenciar la capacidad nutricional del suelo, por lo que en el momento de la siembra se agregaron todo el fósforo y todo el potasio asignados a cada tratamiento. Únicamente en el caso del tratamiento 100-50-0, se agregaron 2,6 qq/ha de la fórmula 26-0-26 8 días después de la siembra, para terminar de cubrir el nivel de potasio establecido y a la vez adicionar un 31% de nitrógeno. A todos los tratamientos se terminaron de aplicar los fertilizantes 10 días antes de la diferenciación del primordio floral, tomando como referencia el ciclo de vida de la variedad Palmar 18.

Para evaluar el nivel productivo de las densidades de siembra que se establecieron, es decir, a 1,60 qq/ha, 2,50 qq/ha, y 3,37 qq/ha, se realizaron las mediciones de laboratorio bajo el reglamento interno para la valoración del arroz en granza según la normativa de CONARROZ, donde se indican las fórmulas ajustadas y estandarizadas para el uso en las industrias arroceras de Costa Rica [10]. Para determinar el rendimiento húmedo y sucio de los tratamientos correspondientes a los tres materiales diferenciados según densidad, se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento húmedo y sucio} = \left( \frac{\text{peso neto}}{1000} \times \frac{10000}{\text{área ensayo}} \right) \times 1000$$

Luego se eliminaron las impurezas, se redujo la humedad a un nivel entre 11,2% y 12,1% y se procedió a sacar el rendimiento seco y limpio:

$$\text{Rendimiento seco y limpio} = \left( \text{Rend} \frac{H}{S} \times \frac{(100 - \text{humedad inicial})}{(100 - 13)} \times \frac{(100 - \text{impurezas})}{(100 - 1,5)} \right)$$

El ente regulador nacional, CONARROZ, admite un porcentaje de humedad de 13% y un 1,5% de impurezas.

Posteriormente se evaluaron por separado los tratamientos a los que se sometió cada material y con base en los rendimientos de grano seco y limpio, se seleccionaron las densidades ideales con las que el productor debería manejar dichas variedades en la región del Pacífico Central [10].

La evaluación de la eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados para cada variedad se realizó mediante la aplicación de la fórmula:

$$\text{Eficiencia de fertilización: } \frac{\text{Rend (mayor) del tratamiento (100-50-100)} - \text{Rend (menor) del tratamiento (50-50-50)}}{\text{Dosis de fertilizante (N)}}$$

Una vez identificados los mejores rendimientos para cada variedad de acuerdo con los tratamientos aplicados, se realizó una comparación entre los resultados de cada uno y se seleccionó el mejor tratamiento tomando en cuenta las condiciones ambientales de Parrita y la interacción entre la densidad de siembra, el nivel de fertilización y el rendimiento productivo. De este modo se generó una guía agronómica sobre el manejo nutricional y la densidad de semilla por área sembrada para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL dirigida a los agricultores del Pacífico central.

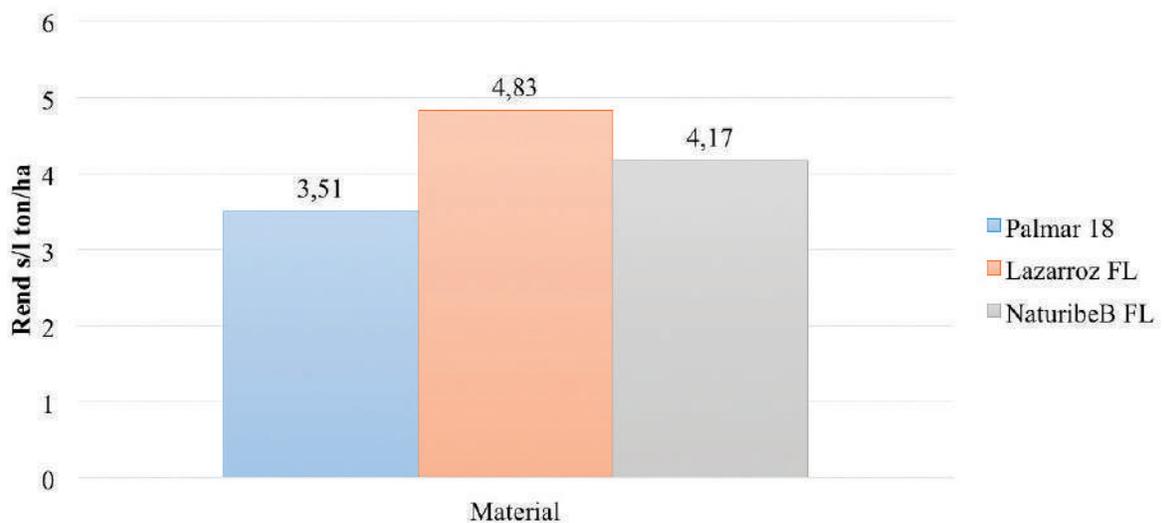
También se realizó un análisis de varianza (andeva) de cada una de las variedades, así como una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para contrastar cada uno de los tratamientos con los restantes, utilizando el programa estadístico de Infostat. Se utilizó un nivel de significancia  $p < 0,05$ .

## Resultados y discusión

### Evaluación del nivel productivo

Las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL en el Pacífico central de Costa Rica resultan afectadas por la densidad de siembra, así como por el nivel de fertilización que se establezca para el cultivo ( $p < 0,0001$ ), conforme a los resultados obtenidos. La media de los rendimientos secos y limpios en toneladas por hectárea para cada variedad fue de 3,51 ton/ha para Palmar 18; 4,83 ton/ha para Lazarroz FL, y 4,17 ton/ha para NayuribeB FL (figura 2).

El promedio nacional para la cosecha 2016-2017 fue de 4,32 toneladas de arroz seco y limpio [11], es decir que Palmar 18 y NayuribeB FL no superaron el promedio nacional. En el caso de Lazarroz FL el rendimiento obtenido fue 11,80% superior al rendimiento promedio nacional, por lo tanto, se puede afirmar que Lazarroz FL es una variedad promisoría en Costa Rica.



**Figura 2.** Rendimiento promedio en toneladas por hectárea con base en la densidad de siembra, para las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL (La Ligia, Parrita, 2017)

Los agricultores en Costa Rica tradicionalmente han empleado densidades de siembra entre 3,5 y 4 quintales por hectárea [12]; sin embargo, esta práctica generalmente propicia el desarrollo de plantas más delgadas y débiles, que son más susceptibles al volcamiento y al ataque de plagas y enfermedades. Las nuevas variedades Palmar 18, Lazarroz FL y principalmente NayuribeB FL, a densidades entre 2,5 y 3,37 quintales por hectárea, propician una mejor respuesta a la fertilización. De acuerdo con lo anterior, se deduce que, pese al potencial genético de las variedades analizadas, el manejo agronómico de la plantación puede incidir en una disminución en la productividad.

La variedad que mostró una mejor respuesta al aumento en la densidad de siembra por hectárea fue Lazarroz FL, ya que superó las 5 toneladas por hectárea (cuadro 4) en promedio a densidades de 2,50 y 3,37 qq/ha, y alcanzó la mejor productividad a 3,37 qq/ha. En el caso de NayuribeB FL, a 2,50 qq/ha logró alcanzar una productividad similar a la obtenida con la variedad anterior a la densidad de 3,37 qq/ha; con esto se deduce que NayuribeB FL es una variedad con mejor capacidad de macollamiento, es decir que a una densidad de 2,50 qq/ha logra generar una cantidad de tallos efectivos mayor que Lazarroz FL y a su vez logra mejores rendimientos por área sembrada que Palmar 18.

### Eficiencia en el uso de los fertilizantes nitrogenados

La deficiencia de nitrógeno afecta la etapa de macollamiento, es decir, el índice de crecimiento de la planta; el fósforo de igual forma afecta el correcto macollamiento, y también puede dañar la panícula si se encuentra en concentraciones tóxicas durante la etapa de maduración [13]. En los tres tratamientos con diferentes niveles de fertilización Lazarroz FL logró ser la variedad más productiva, y se destacó como una variedad muy eficiente, incluso ante bajos niveles de fertilización (cuadro 3).

Los rendimientos siempre fueron mejores cuando se aumentaron tanto el nitrógeno como el Potasio, si bien el suelo presentaba contenidos óptimos de ambos elementos.

Durante el periodo de crecimiento los cultivos absorben grandes cantidades de potasio [14] y en la etapa de madurez, si se encuentra en concentraciones insuficientes, se afectan tanto el macollamiento como la panícula [13], [15]. Por esta razón, al aumentar el suministro de potasio, las tres variedades mostraron una mejora en sus rendimientos (cuadro 4).

**Cuadro 3.** Rendimiento promedio de las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL de acuerdo con los niveles de fertilización 50-50-50, 100-50-0 y 100-50-100 kg/ha (La Ligua, Parrita, 2017)

Dosis de fertilizante kg/ha	50-50-50	100-50-0	100-50-100
Palmar 18	2,52	3,57	4,46
Lazarroz FL	3,43	4,84	6,20
NayuribeB FL	2,72	3,89	5,89

**Cuadro 4.** Rendimiento promedio de las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL de acuerdo con las interacciones entre las tres densidades de siembra y los tres niveles de fertilización (La Ligua, Parrita, 2017)

Densidad de siembra qq/ha	Dosis de fertilizante kg/ha	Tratamiento	Palmar 18		Lazarroz FL		NayuribeB FL	
			Media		Media		Media	
1,60	50-50-50	1	2,00	A*	2,7	A	2,37	A
1,60	100-50-0	2	2,63	B	3,10	AB	2,93	B
1,60	100-50-100	3	3,23	C	4,20	C	4,30	C
Promedio			2,62		3,33		3,20	
2,50	50-50-50	4	2,57	B	3,40	B	2,70	AB
2,50	100-50-0	5	3,77	D	5,30	D	4,13	C
2,50	100-50-100	6	4,87	F	6,63	F	6,57	D
Promedio			3,73		5,11		4,47	
3,37	50-50-50	7	3,00	C	4,20	C	3,10	B
3,37	100-50-0	8	4,30	E	6,13	E	4,60	C
3,37	100-50-100	9	5,27	G	7,77	G	6,80	D
Promedio			4,19		6,03		4,83	

\* Letras distintas muestran diferencias significativas al 0,05 entre los tratamientos.

El mejor rendimiento en los casos de Palmar 18 y Lazarroz FL se alcanzó cuando se sembraron a una densidad de 3,37 qq/ha junto con una dosis de fertilizante de 100-50-100 kg/ha. Es importante destacar que Lazarroz FL alcanzó el mismo rendimiento cuando se emplearon 1,60 qq/ha de semilla junto con la misma dosis de nutrientes, 100-50-100 kg/ha, que cuando se emplearon 3,37 quintales de semilla con una dosis de 50-50-50 kg/ha de nutrientes; por tanto, para esta variedad la densidad de siembra es determinante en el rendimiento por alcanzar en campo.

En el caso de NayuribeB FL se obtuvieron rendimientos similares cuando se sembró a 2,50 y a 3,37 qq/ha de semilla junto con 100-50-100 kg/ha de nutrientes.

Rodríguez [16], Meléndez y Molina [17], el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI, por sus siglas en inglés) [18] y Chaudhary *et al.* [13] coinciden en que la cantidad de los

nutrientes necesarios en los trópicos para producir una tonelada de arroz en cáscara es de 20,5 kg de nitrógeno; 5,1 kg de fósforo, y 44,4 kg de potasio por hectárea. De acuerdo con las medias de cada variedad y su relación con la eficiencia en el uso de los nutrientes, se puede afirmar que la dosis 100-50-100 kg/ha suministrada favoreció a cada una de las variedades y su rendimiento por hectárea.

La eficiencia en el uso de los fertilizantes corresponde a la cantidad de producto cosechado por la unidad de nutrientes aplicada al suelo [19], por lo tanto, cuando se logran mayores rendimientos siempre utilizando la misma cantidad de fertilizante, se ha logrado alcanzar una mayor eficiencia.

La evaluación de la eficiencia de la fertilización nitrogenada, en el caso de Palmar 18, dio como resultado:

$$\text{Eficiencia de fertilización: } \frac{5270\text{kg}-2000\text{kg}}{100} = 32,7\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ de grano por kg de nitrógeno}$$

Es decir, por cada kg por hectárea agregado de nitrógeno, la eficiencia de conversión de la planta fue de 32,7 kg de grano; la eficiencia claramente fue mayor en NayuribeB FL, 44,3 y en Lazarroz FL, 50,7 .

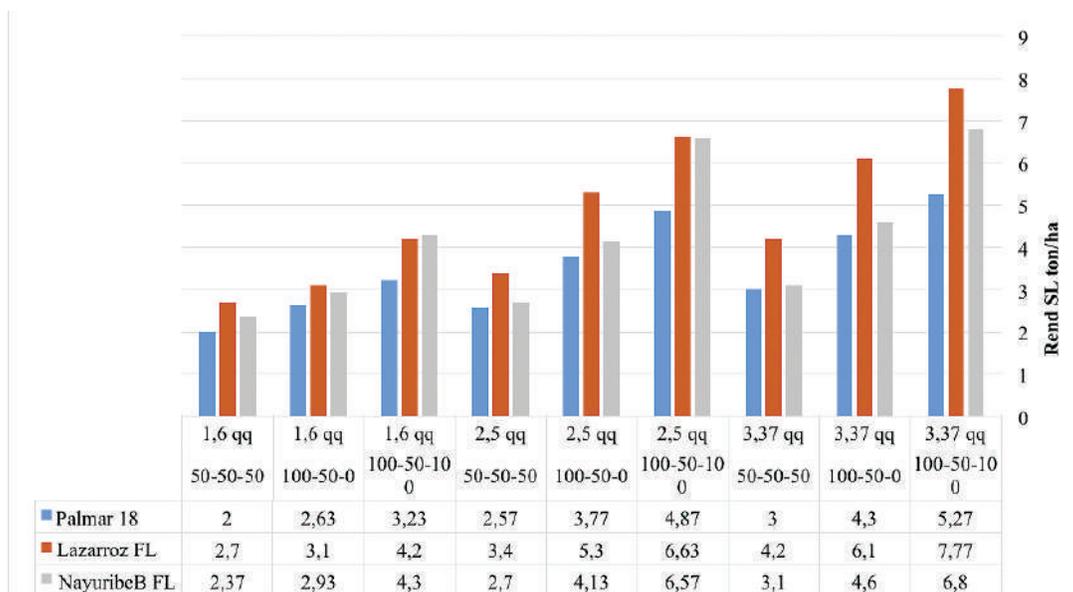
**Cuadro 5.** Valor de *p* para cada una de las variedades analizadas y su interacción con ellas (La Ligua, Parrita, 2017)

Variable	<i>p</i> -valor		
	Palmar 18	Lazarroz FL	NayuribeB FL
Conteo de tallos	0,4009	0,6355	0,2697
Tallos efectivos	0,1452	0,3256	0,0992
Longitud de panícula	0,0016	0,0068	∅0,0001
Cantidad de granos llenos	0,0846	0,0005	0,0040
Peso de 1000 granos	0,0505	0,0012	0,0025

Las deficiencias de nitrógeno así como las deficiencias de fósforo reducen la capacidad de macollamiento de las plantas de arroz [15]. A su vez, las plantas con deficiencia de fósforo presentan tallos más delgados y alargados, siendo a su vez plantas más pequeñas y de crecimiento más retardado. De acuerdo con lo anterior, se determina una concordancia entre la formación deficiente de tallos efectivos y la cantidad de granos llenos para el caso de Palmar 18. El conteo de tallos y los tallos efectivos no mostraron relación con la cantidad de nutrientes suministrada; por lo contrario, la longitud de panícula, la cantidad de granos llenos y el peso de 1000 granos mostraron una respuesta positiva ( $p < 0,001$ ) ante el suministro de nutrientes (cuadro 5).

### Plan de manejo de la densidad de siembra y el nivel de fertilización

La mayor demanda nutricional en el cultivo de arroz corresponde a los elementos nitrógeno, fósforo y potasio, y su nivel de disponibilidad va a depender de las condiciones del suelo, así como del mismo manejo del cultivo [20].



**Figura 3.** Rendimiento en toneladas por hectárea e interacción entre el nivel de fertilización y la densidad de siembra para las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL (La Ligia, Parrita, 2017)

De acuerdo con el rendimiento en toneladas por hectárea, se puede afirmar que las tres variedades alcanzaron los mejores rendimientos cuando se utilizó el programa con 100-50-100 kg de nutrientes por hectárea. En la figura 3 se puede observar con mayor claridad el rendimiento de cada variedad de acuerdo con la interacción entre la densidad de siembra y el nivel de fertilización.

Los niveles de extracción y eficiencia de la fertilización varían entre regiones y principalmente entre variedades, ya que cada variedad tiene una eficiencia específica en la absorción de nutrientes. Los niveles de eficiencia de la fertilización en esta investigación superan los reportados por Molina y Rodríguez [20], lo cual se debe principalmente a la capacidad de las tres variedades, principalmente de Lazarroz FL, de sintetizar el nitrógeno asimilable del medio.

Con respecto a la densidad de siembra, la variedad Palmar 18 mostró una gran adaptabilidad a la zona en cuanto a constancia productiva, sin importar la densidad de siembra a la que se estableció el cultivo. En el caso de Palmar 18, la mejor densidad de siembra se encontró entre 2,5 y 3,37 qq/ha. Dentro de este margen la variedad se va a desempeñar satisfactoriamente.

La variedad Lazarroz FL mostró ser mucho más dependiente de la densidad de siembra que las otras. Cuando se sembró Lazarroz FL a 1,6 qq/ha, los rendimientos nunca superaron las 4 ton/ha. Cuando se sembró a 2,5 qq/ha, el rendimiento aumentó considerablemente; sin embargo, los mejores rendimientos con esta variedad se alcanzaron solo cuando se sembró a 3,37 qq/ha (cuadro 6).

NayuribeB FL en todos los ensayos, sin importar la densidad de siembra, estuvo por encima de Palmar 18; si se sembrara a densidades entre 2,5 y 3,37 qq/ha, se esperarían rendimientos similares a los obtenidos con Lazarroz FL. Estos resultados van a depender de las condiciones del suelo, ambientales y del manejo (cuadro 6).

Los mejores rendimientos de Palmar 18 se obtuvieron cuando se sembró a densidades superiores a 2,5 qq/ha y con una fertilización de 100 kg N - 50 kg P - 100 kg K. ParPalmar 18 en secano, la planta aún podría tolerar más kilogramos de nitrógeno por hectárea, sin sobrepasar los 120 kg/ha, ya que los tallos pueden ceder y volcarse.

**Cuadro 6.** Especificaciones técnicas para las variedades Palmar 18, Lazarroz FL y NayuribeB FL (La Ligia, Parrita)

Variedad	Densidad de siembra sugerida (qq/ha)	Dosis nutricionales sugeridas		
		N	P	K
Palmar 18	2,5 - 3,37	50-100	50	50-100
Lazarroz FL	2,5 - 3,37	50-100	50	50-100
NayuribeB FL	2,5 - 3,37	50-100	50	50-100

Los mejores rendimientos de Palmar 18 se obtuvieron cuando se sembró a densidades superiores a 2,5 qq/ha y con una fertilización de 100 kg N - 50 kg P - 100 kg K. Para Palmar 18 en seco, la planta aún podría tolerar más kilogramos de nitrógeno por hectárea, sin sobrepasar los 120 kg/ha, ya que los tallos pueden ceder y volcarse.

Lazarroz FL es una variedad con capacidad para aprovechar el nitrógeno ambiental por esta razón, a todas las dosis proporcionadas, se logró alcanzar muy buenos rendimientos. El tratamiento con 100-50-100 kg/ha fue el mejor. Para este material no se recomienda sobrepasar los 100 kg de nitrógeno / ha aportado mediante fertilizantes. Esta variedad tiene que sembrarse a densidades no menores de 2,5 qq de semilla / ha, esto para minimizar los problemas de manejo en la finca y para aumentar los rendimientos productivos por hectárea.

La variedad NayuribeB FL cuenta con una alta capacidad de macollamiento, por lo que se sugiere manejarla en seco con densidades entre 2,50 y 3,37 qq/ha y no sobrepasar estas densidades porque se podría incidir en una disminución de los granos llenos por panícula y en la cantidad de panículas por área sembrada. Nutricionalmente NayuribeB FL en seco tolera niveles de fertilización superiores a Lazarroz FL; por lo tanto, se recomienda manejar una fertilización igual a 100 kg de nitrógeno / ha y aumentar la cantidad de potasio, para propiciar un buen crecimiento de panículas y, por consiguiente, un mayor rendimiento del cultivo.

## Conclusiones

Las tres variedades evaluadas alcanzaron su máxima productividad cuando se sembraron a una densidad de 3,37 qq/ha; a su vez, NayuribeB FL no mostró diferencias significativas con ese resultado al sembrarla a 2,50 qq/ha. También se observó que el desempeño de las variedades depende más del vigor genético que de la cantidad de semilla sembrada. NayuribeB FL, sin importar el nivel de fertilización, generó mayor cantidad de tallos efectivos que Lazarroz FL.

Las tres variedades mostraron mayor rendimiento al aumentar el suministro de nitrógeno y potasio. Lazarroz FL fue la variedad más eficiente en aprovechamiento del nitrógeno, además de la más productiva.

En los tratamientos en que se buscó hacer un manejo que generara menor impacto ambiental, es decir, incorporar la menor cantidad de nutrientes a la siembra, se obtuvieron plantas de menor vigor, lo cual se tradujo en menor floración y, por consiguiente, menor rendimiento.

En el Pacífico central de Costa Rica, Palmar 18 y NayuribeB FL se pueden cultivar a densidades iguales o superiores a 2,50 qq/ha; Lazarroz FL requiere ser cultivado a 3,37 qq/ha para mostrar su potencial productivo. El nivel de fertilización para todas las variedades debe ser igual o superior a 100 kg de nitrógeno, al mismo tiempo que debe realizarse un suministro de potasio, y de fósforo cercano o igual a 50 kg; todos los requerimientos van a depender de la concentración de los nutrientes en el suelo.

## Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), "Hacia la elaboración de una estrategia de asistencia técnica de la FAO en apoyo a la implementación de la Iniciativa América Latina y el Caribe Sin Hambre", Ciudad de Guatemala, 2016.
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), "VI Censo Nacional Agropecuario; resultados generales", 2014 [en línea]. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00338.pdf>.
- [3] M. Acevedo Barona *et al.*, "Efectos de la densidad de siembra y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de granos de arroz del cultivar centauro en Venezuela", *Agronomía Tropical*, vol. 61, no. 1, pp. 15-26, 2011.
- [4] R. Tinoco y A. Acuña, "Manual de recomendaciones técnicas del cultivo de arroz (*Oryza sativa*)", San José, Costa Rica: INTA, 2008 [en línea]. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00177.pdf>.
- [5] CONARROZ, "Informe estadístico periodo 2016/2017", Unidad de Inteligencia de Mercados, Dirección de Operaciones, Costa Rica, 2016 [en línea]. Disponible en [https://www.conarroz.com/UserFiles/File/INFORME\\_ANUAL\\_ESTADISTICO\\_PERIODO\\_2016\\_2017.pdf](https://www.conarroz.com/UserFiles/File/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_PERIODO_2016_2017.pdf)
- [6] D. Guzmán, "Manejo agronómico del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) sembrado bajo riego en finca Ranchos Horizonte", Cañas, Guanacaste, Costa Rica, pp. 6-8, 2006.
- [7] FAO, "Agricultura mundial hacia los años 2015/2030", Roma, Italia, 2002 [en línea]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>
- [8] H. Jiménez, "Anatomía del sistema de clasificación de Holdridge", Turrialba, Costa Rica, 1982.
- [9] R. Mata, A. Vásquez y A. Rosales, "El mapa de suelos de Costa Rica con leyenda WRB", 2016.
- [10] CONARROZ, "Reglamento interno del mecanismo para la valoración del arroz en granza", 2004 [en línea]. Disponible en <http://www.conarroz.com/UserFiles/File/Transparencia/MECANISMOparaLaVALORACIONdelARROZenGRANZAparaCOSTA%20RICA.pdf>
- [11] CONARROZ, "Informe estadístico periodo 2016/2017", Unidad de Inteligencia de Mercados, Dirección de Operaciones, 2017.
- [12] CONARROZ, "Factores claves en el manejo de arroz de secano", San José, Costa Rica, 2005 [en línea]. Disponible en <http://www.conarroz.com/pdf/Factores%20claves%20en%20el%20manejo%20de%20arroz%20de%20secano.pdf>
- [13] R.C. Chaudhary, J. S. Nanda y D.V. Tran, "Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz", FAO, Roma, Italia, 2003.
- [15] Potash & Phosphate Institute, "Identificación de los problemas nutricionales en arroz", 2017 [en línea]. Disponible en [https://ipni.net/ppiweb/gltamn.nsf/\\$webindex/E4B79420325A209705256ECB004BDE01?opendocument&print=1](https://ipni.net/ppiweb/gltamn.nsf/$webindex/E4B79420325A209705256ECB004BDE01?opendocument&print=1)
- [16] J. Rodríguez, "Fertilización del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.)", XI Congreso Nacional Agronómico, pp. 1-14, 1999.
- [17] G. Meléndez y E. Molina, "Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica", Centro de Investigaciones Agronómicas, pp. 92-103, 2001.
- [18] Instituto Internacional de Nutrición de Plantas, "Requerimientos nutricionales de los cultivos", *Archivo Agronómico no. 3*, 2002 [en línea]. Disponible en <http://lacs.ipni.net/topic/agronomic-files>.
- [19] R. Ramírez, "El uso eficiente de los fertilizantes y el incremento de la productividad agrícola en Venezuela", *Agronomía Tropical*, vol. 40, 1990 [en línea]. Disponible en [http://www.sian.inia.gob.ve/revistas\\_ci/Agronomia%20Tropical/at4013/pdf/ramirez\\_r.pdf](http://www.sian.inia.gob.ve/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4013/pdf/ramirez_r.pdf)
- [20] E. Molina y J. Rodríguez, "Fertilización con N, P, K y S, y curvas de absorción de nutrimentos en arroz var cfx. 18 en Guanacaste", *Agronomía Costarricense*, 2012.

# Identificación de explosivos Orgánicos en Indicios Post-Explosión mediante GC-MS y GC-NPD

## Identification of Organic Explosives Clues Post- Explosion by GC-MS And GC-NPD Methods

Stephanie Arce-Rubí<sup>1</sup>, Steven Vargas-Ramírez<sup>2</sup>, Efraín Solís-Montiel<sup>3</sup>,  
Gilberto Piedra-Marín<sup>4</sup>, Jose Carlos Mora-Barrantes<sup>5</sup>,  
José Pablo Sibaja-Brenes<sup>6</sup>, Henry Borbón-Alpizar<sup>7</sup>

Arce-Rubí, S; Vargas-Ramírez, S; Solís-Montiel, E; Piedra-Marín, G; Mora-Barrantes, J.P; Sibaja-Brenes, J; Borbón-Alpizar, H. Identificación de explosivos orgánicos en indicios Post-Explosión mediante GC-MS y GC-NPD. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 25-44.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4377>

- 1 Químico industrial. Departamento de Ciencias Forenses del Organismo de Investigación Judicial, Costa Rica. Correo electrónico: stephy1608@gmail.com.
- 2 Químico puro. Departamento de Ciencias Forenses del Organismo de Investigación Judicial. Costa Rica.
- 3 Químico puro. Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: efrainsolism@gmail.com.
- 4 Químico puro. Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: gilberto.piedra.marin@una.cr  
 <https://orcid.org/0000-0003-1332-236X>
- 5 Químico industrial. Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr  
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 6 Químico industrial. Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: jose.sibaja.brenes@una.cr  
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 7 Químico industrial. Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: henry.borbon.alpizar@una.cr  
 <https://orcid.org/0000-0003-0869-4126>



## Palabras clave

Explosivos; detonaciones; cromatografía; componentes explosivos; validación.

## Resumen

Se implementó y validó un método para la identificación de explosivos por medio de cromatografía de gases acoplada a un detector de espectrometría de masa (GC-MS) y por cromatografía de gases de doble columna acoplada a dos detectores de fósforo-nitrógeno (GC-NPD). El método establecido incluyó el análisis de sustancias explosivas (analitos) de diferente naturaleza química como TNT, TNB, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 2-NT, 3-NT, 4-NT, PETN, NG, RDX y tetril, entre otros. Se evaluó para cada analito el límite de detección, la variabilidad en el tiempo de retención en términos de repetibilidad y precisión intermedia, en ambas técnicas cromatográficas. Utilizando GC-MS las correlaciones encontradas entre los espectros de masas de los patrones y los de los analitos fueron superiores al 90 % para la mayoría de los nitrotoluenos y los estabilizantes de pólvora libre de humos. El análisis por GC-NPD se presentó como método alternativo para la identificación de los mismos analitos que se determinan por GC-MS, exceptuando el PETN y el 1,3,5-TNB. Los límites de detección fueron inferiores en uno o dos órdenes de magnitud en relación con los alcanzados por GC-MS y la precisión de los tiempos de retención resultó ser satisfactoria para un análisis cromatográfico. Finalmente, se probó la veracidad y la efectividad de los métodos mediante el análisis de indicios post-exposición obtenidos de las explosiones controladas de seis artefactos explosivos improvisados con cargas explosivas de composición conocida. Los procesos de extracción de las muestras mediante solventes, seguidos por el análisis preliminar de las muestras por TLC y el análisis por GC-MS y GC-NPD permitieron realizar la identificación de al menos un componente explosivo en el 83 % de los casos.

## Keywords

Explosives; detonations; chromatography; explosive components; validation.

## Abstract

Methods for the identification of explosives by means of Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) and Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detectors (GC-NPD) were implemented and validated. The methods established included the analysis of the following explosive substances: TNT, TNB, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 2-NT, 3-NT, 4-NT, PETN, NG, RDX and tetril. For each analyte, the detection limit, the variability in retention time for each analyte, in terms of repeatability and intermediate precision were evaluated by using both chromatography techniques. By means of GC-MS the correlations found between the mass spectrum of the standards and those of the analytes went over 90% for the majority of the nitrotoluenes and for some stabilizers of smoke-free gunpowder. The GC-NPD analysis is an alternative method for the identification of the same analytes done by using GC-MS, with the only exceptions of PETN and 1,3,5-TBN. The detection limits of these two compounds were inferior with respect to the ones reached by GC-MS. Finally, veracity and effectiveness for both methods were proven by analysing post-explosion samples of six explosive materials. All the explosion events were developed under controlled situations. The samples were extracted through organic solvents; then they were analysed by TLC, GC-MS and GC-NPD. This methods allowed the identification at least of one explosive component in the majority of the samples (83%).

## Introducción

Según Akhavan [1] y Meyer *et ál* [2], los explosivos son sustancias químicas puras o mezcladas que por la acción de un estímulo externo experimentan un cambio químico sin una fuente externa de oxígeno, con liberación de grandes cantidades de energía y evolución de gases calientes, todo en un tiempo muy breve. Meyer *et ál* [2] y Beveridge [3] señalan que la capacidad de un explosivo para descomponerse obedece a reordenamientos internos favorecidos termodinámicamente y entrópicamente, considerando la Akhavan [1] divide el proceso de explosión en tres tipos: explosiones físicas, explosiones atómicas y explosiones químicas.

En relación a las explosiones químicas, Venugopalan [4] considera explosiva una sustancia química que tiene una alta energía potencial y puede liberarla en un período muy corto de tiempo. Venugopalan [4] y Urbanski [5] atribuyen las propiedades explosivas químicas a un fenómeno molecular. Waley [6] agrupa los explosivos en categorías como Nitro (Ej.: 2,4,6 trinitrotolueno, TNT), Nitroéster (Ej.: nitroglicerina), Clorato (Ej.: clorato de potasio), Perclorato (Ej.: perclorato de amonio), Acetiluro (acetiluro de cobre), Peróxido (triperóxido de triacetona) y Azida (fulminato de mercurio).

Según la Encyclopedia of Analytical Chemistry [7] la importancia del análisis de los explosivos radica principalmente en su uso legal, por ejemplo, en la industria o el ámbito militar, según la coyuntura gubernamental de cada país. El uso de explosivos es ilegal en el terrorismo y en la actividad criminal. Peterson [8] indica que en los campos militar e industrial los explosivos se analizan de forma rutinaria después de su producción, para el control de calidad, siendo relevante no solo el análisis cualitativo, sino también la cuantificación de las sustancias explosivas e impurezas.

Con respecto al impacto ambiental de los explosivos, Hewitt [9] señala que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US Environmental Protection Agency (EPA, por sus siglas en inglés), ha establecido algunos métodos para el análisis de explosivos en suelos y en aguas a través de técnicas cromatográficas y de inmunoensayos, como las siguientes [10-17]: 8515/EnSys RIS (método de detección colorimétrico), 8510/EnSys RIS (método de detección colorimétrico), 4050/D TECH (inmunoensayo), 4051/D TECH (inmunoensayo), 8330A y 8330B (HPLC), 8095 (cromatografía de gases) y 529 (cromatografía de gases y espectrometría de masas). Entre algunos analitos que se puede analizar con las técnicas anteriores están los siguientes: TNT 2,4,6 trinitrotolueno, TNB: 1,3,5-trinitrobenceno, DNB: dinitrobenceno, DNT: dinitrotolueno, RDX: ciclotetrametilentrinitramina, HMX: ciclotetrametilentrinitramin, PETN: tetranitrato de pentaeritrita, NQ: nitroguanidina, NC: nitrocelulosa, NG: nitroglicerina y NT= nitrotolueno.

Schade [18] y Varga [19] indican que existen diferentes técnicas utilizadas para el análisis de explosivos, algunas de las cuales se usan para el análisis *in situ* y detección de explosivos en tiempo real. Respecto a las técnicas analíticas Byall [20] Royds [21], Garrido [22] y Rhykerd [23] señalan las siguientes: cromatografía de gases acoplada a un analizador térmico de energía (GC-TEA), cromatografía líquida de alta eficiencia, ultravioleta, acoplada a un detector con arreglo de diodos (HPLC-UV o DAD), cromatografía de gases acoplada a detector selectivo de masas (GC-MS), y cromatografía líquida acoplada a un detector selectivo de masas (LC-MS). Entre los tipos de explosivos que se puede analizar con estas técnicas los autores mencionados indican algunos grupos: halógenos, peróxidos, quinonas y compuestos del grupo nitro, orgánicos, plastificantes y estabilizantes, e inorgánicos.

El proyecto de investigación que aquí se presenta tuvo como objetivo la identificación química de los explosivos de tipo orgánico más comúnmente utilizados en las composiciones explosivas (principalmente en los explosivos propelentes y los explosivos militares) utilizando las técnicas de análisis de cromatografía de gases acoplada a detector selectivo de masas (GC-MS) y cromatografía de gases acoplada a detector de fósforo-nitrógeno (GC-NPD), con el fin de verificar cuál es más eficiente en función de los diferentes parámetros de desempeño evaluados.

## Metodología

### Equipos analíticos

#### *Cromatógrafo de gases con detector selectivo de masas (GC-MSS)*

Se utilizó un cromatógrafo de gases, marca Agilent Technologies, modelo 7890A, el cual cuenta con un automuestreador y autoinyector marca Agilent Technologies, modelo 7693, acoplado a un detector de espectrometría de masas inerte con un cuadrupolo, marca Agilent Technologies, modelo 5975C. Se utilizó una columna HP-5MS (de bajo sangrado, 5 % de fenilpolisiloxano y 95 % metilpolisiloxano) de 30 m de longitud, 0,25 mm de diámetro interno y una película enlazada de 0,25 µm de espesor, marca Agilent Technologies J&W. En el puerto de inyección, el equipo posee un *liner* tipo *Split*, de 4 mm de diámetro interno, con lana de vidrio desactivada y septa *Advance Green*. El gas de arrastre utilizado fue helio, de ultra alta pureza (UAP), proveniente de un cilindro marca Praxair de *The Balbach Company*.

#### *Cromatógrafo de gases con doble detector de nitrógeno-fósforo (GC-NPD)*

Se utilizó un cromatógrafo de gases, marca Agilent Technologies 6890+Plus; el equipo cuenta con un automuestreador y autoinyector marca Agilent Technologies, modelo 7693. El cromatógrafo cuenta con doble columna; la primera de ellas es una columna capilar HP- 5MS de 30 m de longitud con una película enlazada de 0,25 µm y diámetro interno de 0,25 mm, marca Agilent Technologies, acoplada al detector NDP2 A, y la segunda es una columna capilar J&W 122-0732 [(14 % cianopropil-fenil)-metilpolisiloxano (DB-1701)] de 30 m de longitud con una película enlazada de 0,25 µm x 0,25 mm de diámetro, acoplada al detector NPD1 B; cada detector de nitrógeno y fósforo (NPD) es de la marca Agilent Technologies.

Los gases utilizados fueron hidrógeno y helio, de ultra alta pureza (UAP), provenientes de un cilindro marca Praxair de *The Balbach Company*; nitrógeno proveniente de un generador marca Dominick Hunter, modelo G2-110W, y aire procedente de un generador marca Dominick Hunter, modelo UHP-35ZA-S. El puerto de inyección posee un *liner splitless* de 4 mm de diámetro interno, con lana de vidrio desactivada y septa *Advance Green*.

### Reactivos químicos

Los siguientes son los reactivos y productos químicos utilizados: acetato de etilo (grado pesticida, Fisher Scientific), acetona (grado HPLC, Merck), acetonitrilo (grado HPLC, Merck), etanol (calidad A.C.S, J.T. Baker), hidróxido de potasio (calidad A.C.S, J.T. Baker), reactivo de Griess, tricloroetano (Merck) y una mezcla de hidróxido de potasio en etanol al 5 % en volumen.

### Materiales de referencia

Los siguientes son los materiales de referencia utilizados: 1,3,5-trinitrobenceno 1000 µg/mL en acetonitrilo (SUPELCO), 2,4,6-trinitrotolueno 1000 µg/mL en acetonitrilo (SUPELCO), 2,4-dinitrotolueno 1000 µg/mL en acetonitrilo (SUPELCO), 2,6-dinitrotolueno 1000 µg/mL en acetonitrilo (SUPELCO), 2-nitrotolueno 1000 µg/mL en metanol:acetonitrilo (1:1) (AccuStandard), 3-nitrotolueno 1000 µg/mL en metanol:acetonitrilo (1:1) (AccuStandard), 4-nitrotolueno 1000 µg/mL en metanol:acetonitrilo (1:1) (AccuStandard), HMX 1000 µg/mL en metanol:acetonitrilo (1:1) (AccuStandard), nitroglicerina al 1 % en masa (Merck), PETN 1000 µg/mL en acetonitrilo (Cerilliant), RDX 1000 µg/mL en metanol:acetonitrilo (1:1) (AccuStandard) y tetril 1000 µg/mL en acetonitrilo (SUPELCO.).

## Curva de calibración

Se prepararon disoluciones madre a una concentración de 200 mg/L de cada analito, utilizando acetonitrilo grado HPLC como disolvente. Además, se prepararon seis disoluciones a partir de las disoluciones madre de 200 mg/L de cada analito para ser utilizadas en el GC-MS, según criterios tomados al inyectar individualmente cada analito y conociendo los tiempos de retención.

Las mezclas se establecieron de la siguiente forma:

- Mezcla GC-MS-1: 2,4-dinitrotolueno, 2,6-dinitrotolueno, nitroglicerina, etilcentralita, difenilamina, N-NO-difenilamina, 4-amino-2,6-dinitrotolueno y 2-amino-4,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L y 15 mg/L.
- Mezcla GC-MS-2: TNT, 2-NT, 3-NT, 4-NT, 4-amino-2,6-dinitrotolueno y 2-amino-4,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L y 15 mg/L.
- Mezcla GC-MS-3: RDX y 4-amino-2,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L y 150 mg/L.
- Mezcla GC-MS-4: TNB y 4-amino-2,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L y 150 mg/L.
- Mezcla GC-MS-5: PETN y 4-amino-2,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L y 150 mg/L. Mezcla GC-MS-6: Tetril y 4-amino-2,6-dinitrotolueno, en acetonitrilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L y 150 mg/L.

También, se prepararon dos mezclas a partir de las disoluciones madre de 200 mg/L de cada analito para ser utilizadas en el GC-NPD, separadas de la siguiente forma:

- Mezcla GC-NPD-1: 2,4-dinitrotolueno, 2,6-dinitrotolueno, nitroglicerina, etilcentralita, difenilamina, N-NO-difenilamina, 4-amino-2,6-dinitrotolueno y 2-amino-4,6-dinitrotolueno, en acetato de etilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L y 15 mg/L a partir de las disoluciones madre preparadas en acetonitrilo. Fueron preparadas con un contenido de un 10% en volumen de nitrógeno como máximo, para que no interfiriera en el análisis.
- Mezcla GC-NPD-2: TNT, 2-NT, 3-NT, 4-NT, Tetril, RDX, 4-amino-2,6-dinitrotolueno y 2-amino-4,6-dinitrotolueno, en acetato de etilo. Se prepararon calibradores a las siguientes concentraciones: 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L y 15 mg/L, considerando el mismo porcentaje máximo en volumen de nitrógeno que la mezcla GC-NPD-1.

## Separación cromatográfica

Para el análisis de los materiales explosivos mediante el GC-MS, se tomó como referencia las condiciones cromatográficas de operación descritas por la US Environmental Protection Agency [17] en el método 529: "Determination of explosives and related compounds in drinking water by solid phase extraction and capillary column gas chromatography/mass spectrometry" (GC/MS). Una de las diferencias más importantes entre el método utilizado y el método 529 de EPA es la ausencia de un sistema de inyección con temperatura de vaporización programada (PTV), que permite modificar la temperatura durante la inyección de la muestra e inyectar volúmenes superiores a los 10 µL en el cuerpo de PTV, con el fin de concentrar las muestras al ingresar a la columna [29]. La otra diferencia importante es la temperatura inicial del inyector; el método

529 de EPA [17] recomienda una temperatura del inyector baja debido a que algunas de las sustancias explosivas son muy termolábiles, pero en el equipo utilizado la temperatura mínima recomendada es de 150 °C, ya que normalmente opera en un rango de 200 °C a 300 °C. Por otra parte, es importante mencionar que, además del método en modo *splitless* recomendado, se probó el método con las mismas condiciones, pero en modo *splitless pulsado*, el cual había dado buenos resultados con otro tipo de analitos; sin embargo, en el caso de los explosivos en el estudio no hubo mejora alguna, por lo tanto, se decidió continuar con el método en modo *splitless*.

El mismo método se utilizó para el análisis mediante el GC-NPD; no obstante, se ajustaron las condiciones de algunos parámetros con expertos en toxicología. En este método sí se utilizó en modo *splitless pulsado*, para empujar los analitos a la columna y evitar su permanencia en el *liner*. Las condiciones utilizadas se detallan a continuación.

#### Condiciones instrumentales de análisis

En los siguientes cuadros se detallan las condiciones instrumentales de análisis mediante el GC-MS y el GC-NPD.

**Cuadro 1.** Condiciones instrumentales de análisis mediante el GC-MS

Condiciones del inyector	Condiciones del horno	Columna capilar	Detector MS
Modo: <i>splitless</i> Volumen de inyección: 1,00 µL Temperatura inicial: 150 °C Presión: 12,691 psi Flujo total: 64,542 mL/min Purga del septum: 3 mL/min Gas auxiliar: 16,4 mL/min después de 4 min Purga de flujo al <i>split vent</i> : 60 mL/min a los 2 min Tipo de gas: helio, grado UAP Tiempo total: 29,0 min	Temperatura máxima: 325 °C Tiempo de equilibrio: 1 min Programación de temperatura: 45 °C por 3,3 min, luego una rampa de 10 °C/min hasta 210 °C por 0 min y una rampa de 20 °C/min hasta 250 °C por 7,2 min Tiempo de corrida: 29 min	Agilent 19091S-433HP-5MS 5% Phenyl Methyl Silox 30 m x 250 µm x 0,25 µL Flujo: 1,54 mL/min Presión inicial nominal: 12,691 psi Velocidad promedio: 45,138 cm/s Tiempo de espera: 1,32 min	Retraso de disolvente: 4,50 min <i>Gain Factor</i> : 1 Voltaje EM resultante: según archivo de sintonización <i>autotune</i> Rango de detección de masa: de 42 a 420 uma Umbral: 150 MS cuadrupolo: 150 °C MS fuente: 230 °C Modo: <i>scan</i>

#### Validación de los métodos establecidos por GC-MS y GC-NPD

Los parámetros de desempeño evaluados para los métodos cromatográficos establecidos fueron el límite de detección, así como a variabilidad en el tiempo de retención para cada analito, en términos de repetibilidad y precisión intermedia. La estimación del límite de detección instrumental en los métodos por GC-MS y GC-NPD para los analitos evaluados, se realizó mediante el método de Miller & Miller, según la siguiente ecuación [24]:

$$y = y_B + 3 S_B \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde

y = concentración que genera la señal en el instrumento

y<sub>B</sub> = la ordenada en el origen de la recta de calibrado

S<sub>B</sub> = la desviación estándar de la recta de calibrado

**Cuadro 2.** Condiciones instrumentales de análisis mediante el GC-NPD

Condiciones del inyector	Condiciones del horno	Columna capilar 1	Columna capilar 2	Detector NPD1 B:	Detector NPD2 A:
Modo: <i>splitless</i> pulsado Volumen de inyección: 2,00 µL Temperatura inicial: 150 °C Presión: 18,11 psi Presión pulsada: 25,00 psi Tiempo pulsado: 0,50 min Flujo de purga: 50,0 mL/min Tiempo de purga: 1,50 min Flujo total: 56,1 mL/min Gas auxiliar: encendido Corte de solvente: 5,00 min Tipo de gas: helio	Temperatura inicial: 55 °C Tiempo inicial: 3,30 min Temperatura máxima: 310 °C Tiempo de equilibrio: 1,00 min Programación de temperatura: rampa de 7 °C/min hasta 210°C por 0 min y rampa de 20 °C/min hasta 250 °C por 5,56 min Temperatura posterior a la corrida: 70 °C Tiempo posterior a la corrida: 0 min Tiempo de corrida 33 min	Modelo: Agilent 19091S-433HP-5MS 5 % Phenyl Methyl Siloxane 30 m x 250 µm x 0,25 µL Modo: flujo constante Temperatura máxima: 325 °C Flujo inicial: 1,7 mL/min Presión inicial nominal: 18,11 psi Velocidad promedio: 37,0 cm/s	Modelo: JW 122-0732 (14 % cianopropil-fenil)-metilpolisiloxano 30 m x 250 µm x 0,25 µL Modo: flujo constante Temperatura máxima: 300 °C Flujo inicial: 1,7 mL/min Presión inicial nominal: 18,11 psi Velocidad promedio: 37,0 cm/s	Temperatura: 320 °C Flujo de hidrógeno: 3,0 mL/min Flujo de aire: 60,0 mL/min Modo: columna constante con cambio de flujo Flujo combinado: 7,0 mL/min Cambio de flujo: encendido Gas auxiliar: nitrógeno (5,3 mL/min) Tiempo de equilibrio: 5,00 min	Temperatura: 320 °C Flujo de hidrogeno: 3,0 mL/min Flujo de aire: 60,0 mL/min Modo: columna constante con cambio de flujo Flujo combinado: 7,0 mL/min Cambio de flujo: encendido Gas auxiliar: nitrógeno (5,3 mL/min) Tiempo de equilibrio: 5,00 min

Para determinar el límite de detección, en tres fechas diferentes, se prepararon y se inyectaron los patrones para establecer las curvas de calibración de cada analito (durante 6 meses para el GC-MS y 11 meses para el GC-NPD). En cada fecha se inyectó la curva por quintuplicado a diferentes concentraciones, dependiendo del analito (ver cuadros 3 y 4). El cálculo del límite de detección se realizó con una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel®88, con base en el método de Miller & Miller [24].

Para la comprobación del límite de detección y de acuerdo a lo recomendado por Skoog [25], se verificó la relación señal/ruido en el calibrador de concentración más cercana a la concentración estimada del límite de detección. Se determinó la variabilidad en el tiempo de retención para cada analito, en términos de repetibilidad y precisión intermedia. Para determinar la repetibilidad en tres diferentes fechas, se inyectó la curva de calibración de cada analito (durante 6 meses para el GC-MS y 11 meses para el GC-NPD), en cada fecha por quintuplicado, a diferentes concentraciones dependiendo del analito (cuadros 3 y 4). Se realizó un promedio de los tiempos de retención de cada analito; se determinaron las desviaciones estándar y los coeficientes de variación de los tiempos de retención para cada analito en cada una de las tres fechas. Finalmente la estimación de la precisión intermedia, se evaluó como el límite de repetibilidad

entre las tres corridas, utilizando ecuaciones (2 y 3) que consideraran la desviación estándar de la repetibilidad y las desviaciones estándares de los tres eventos (tres corridas).

$$S_r = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 / 3)^{1/2} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$\text{Límite de } S_r = 2,8 \times S_r \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

$S_r$  = Desviación estándar de la repetibilidad

$S_1$  = Desviación estándar en el primer evento

$S_2$  = Desviación estándar en el segundo evento

$S_3$  = Desviación estándar en el tercer evento

**Cuadro 3.** Concentraciones y número de réplicas de cada analito para el cálculo del límite de detección en el GC-MS, mediante el método de Miller & Miller

Analito	Cantidad de réplicas totales de cada analito en los tres eventos	Concentraciones para la curva de calibración (mg/L)
1,3,5-trinitrotolueno	15	75, 100, 125, 150
2,4,6-trinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2,4-dinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2,6-dinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
3-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
4-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
Difenilamina	15	4, 6, 8, 10, 15
Etilcentralita	15	4, 6, 8, 10, 15
Nitroglicerina	15	75, 100, 125, 150
PETN	15	75, 100, 125, 150
RDX	15	75, 100, 125, 150
Tetril	15	75, 100, 125, 150

## Detonaciones

Se realizaron 6 detonaciones de pequeñas cantidades de material explosivo de diferente naturaleza, bajo condiciones controladas. A los Artefactos Explosivos Improvisados (IED) que se utilizaron en las pruebas de campo, se les asignaron las identificaciones internas EXPLO-1-PE, EXPLO-2-PE, EXPLO-3-PE, EXPLO-4-PE, EXPLO-4-PE, EXPLO-5-I y EXPLO-6-PE

**Cuadro 4.** Concentraciones y número de réplicas de cada analito para el cálculo del límite de detección en el GC-NPD, mediante el método de Miller & Miller

Analito	Cantidad de réplicas totales de cada analito en los tres eventos	Concentraciones para la curva de calibración (mg/L)
2,4,6-trinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2,4-dinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2,6-dinitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
2-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
3-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
4-nitrotolueno	15	4, 6, 8, 10, 15
Difenilamina	15	4, 6, 8, 10, 15
Etilcentralita	15	4, 6, 8, 10, 15
Nitroglicerina	15	4, 6, 8, 10, 15
RDX	15	4, 6, 8, 10, 15
Tetril	15	4, 6, 8, 10, 15

#### *Recolección de los indicios post-explosión:*

En la recolección de la muestra se siguió lo recomendado por Akhanan [1] y Thurman [26]. El material recolectado se almacenó en una bolsa de papel *kraft* debidamente identificada, para ser trasladado de esta forma al laboratorio para su posterior análisis.

#### **Análisis cromatográfico de las muestras por GC-MS y GC-NPD**

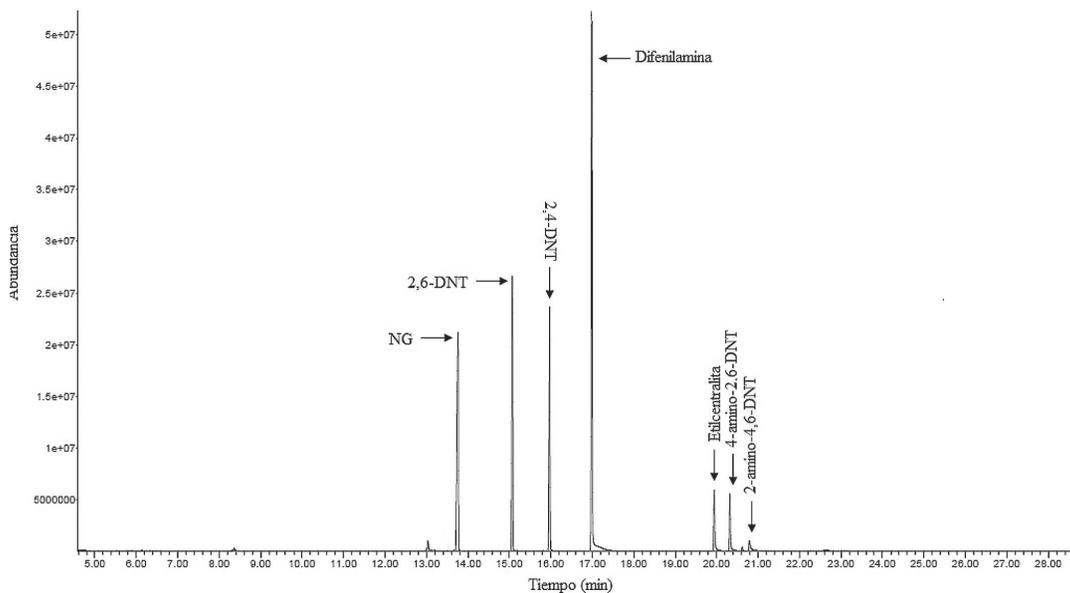
Se realizaron análisis de cada una de las muestras cuestionadas, empleando controles positivos y negativos, así: a) al iniciar la secuencia de inyección, se colocaron al menos tres blancos instrumentales de acetato de etilo para verificar la limpieza del sistema; b) se colocaron dos blancos instrumentales de acetato de etilo previamente a cada muestra cuestionada, a cada control negativo y a cada control positivo; c) se les dio prioridad de inyección a los controles negativos, seguidamente a las muestras cuestionadas y por último a los controles positivos, para que estos no contaminaran las muestras cuestionadas ni los controles negativos, y d) se colocaron al menos tres blancos instrumentales de acetato de etilo al final de la secuencia para verificar la limpieza del instrumento.

## **Resultados**

### **Por GC-MS**

En la figura 1 se muestra la separación cromatográfica obtenida de la mezcla GC-MS-1 a una concentración de 10 mg/L, compuesta por 2,4-dinitrotolueno, 2,6-dinitrotolueno, nitroglicerina, etilcentralita, difenilamina, N-nitrosodifenilamina, 4-amino-2,6-dinitrotolueno y 2-amino-4,6-dinitrotolueno. La separación cromatográfica de la mezcla GC-MS-1 presentó una distribución de picos cromatográficos bien resueltos de todos los componentes, que aparecieron primero

13 minutos después de dar inicio la corrida y continuaron apareciendo hasta antes de completar los 21 minutos, ubicándose hacia la parte media de la duración total de la corrida cromatográfica. Como se muestra en la figura 1, se logró una separación cromatográfica de cada uno de los analitos incluidos en la mezcla GC-MS-1, según sus tiempos de retención, excepto de la difenilamina y la N-nitrosodifenilamina porque ambas sustancias coeluyen y las bibliotecas espectrales utilizadas identifican la señal obtenida únicamente como difenilamina. Con base en estos resultados se descartó la N-nitrosodifenilamina como analito. La señal con alta abundancia entre los 13,5 y los 14,0 minutos corresponde a la nitroglicerina; no obstante se recomienda la búsqueda por iones para confirmar la presencia de este compuesto.

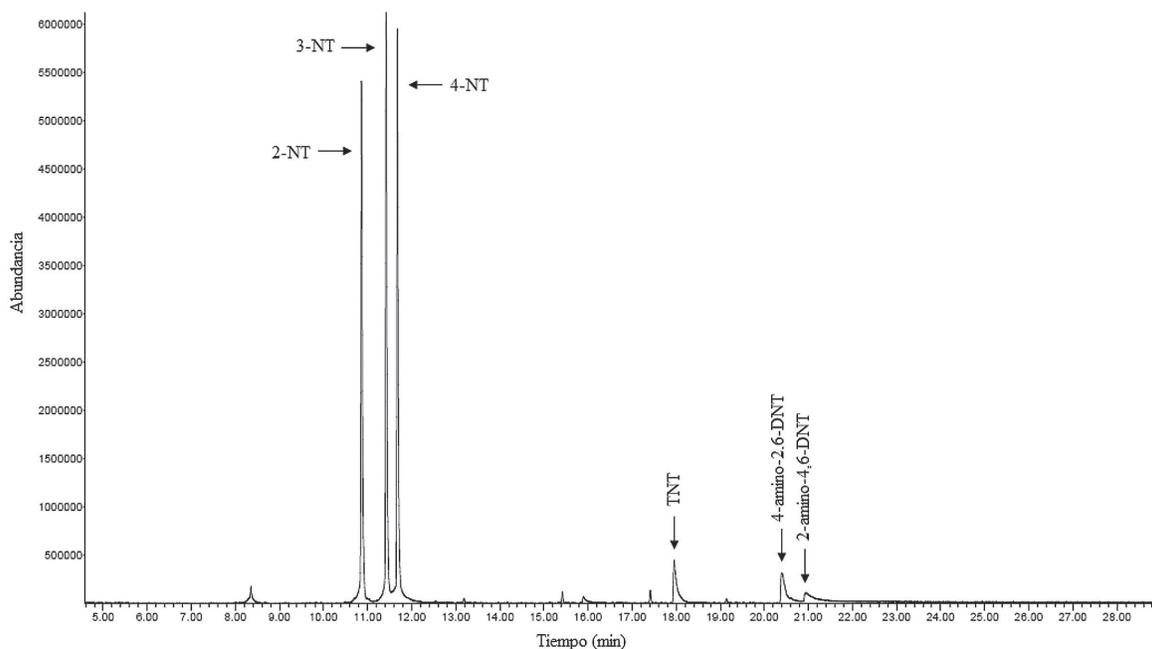


**Figura 1.** Cromatograma de iones totales de la mezcla GC-MS-1 a 10 mg/L, en cada componente

La figura 2 muestra la separación cromatográfica obtenida para los analitos que componían la mezcla GC-MS-2. Es evidente que fue posible resolver adecuadamente las señales para los diferentes analitos, por lo tanto, la separación cromatográfica de la mezcla GC-MS-2 presentó una distribución de picos cromatográficos adecuadamente resueltos de todos los componentes, que aparecieron primero a los 10 minutos después de iniciar la corrida, y continuaron apareciendo hasta antes de completar los 22 minutos, ubicándose en la parte media de la duración total de la corrida cromatográfica. El comportamiento de la separación cromatográfica de la mezcla GC-MS-2 fue muy similar al de la mezcla GC-MS-1. Los tiempos (min.) de retención estimados de los analitos de la mezcla GC-MS-1 en orden de elución fueron nitroglicerina (13,807), 2,6 dinitrotolueno (15,137), 2,4 dinitrotolueno (16,037), difenilamina (17,059), etilcentralita (20,013), 2-amino-4,6-dinitrotolueno (20,943) y 4-amino-2,6-dinitrotolueno (20,488). En el caso de la mezcla GC-MS-2, los tiempos (min) de retención de los analitos en orden de elución fueron 2-nitrotolueno (10,939), 3-nitrotolueno (11,432), 4-nitrotolueno (11,755) y 2,4,6-trinitrotolueno (18,023).

Según los datos de tiempo de retención, se tiene que el analito RDX exhibió una peculiaridad que no se manifestó en los otros analitos, debido a la aparición de una señal constante a 19,8 minutos. Esto pudo ser debido a que el mecanismo de descomposición térmica del RDX no está del todo clarificado. Estudios de Underill y Bardon [27] indican que inicialmente debe ocurrir

una pérdida de HNO<sub>2</sub> y la formación de un doble enlace entre el carbono y el nitrógeno. Los límites de detección (mg/L, valor de la concentración del analito en el extracto o la cantidad de nanogramos de analito inyectados en un µL de extracto) estimados para los analitos en estudio por GC-MS, calculados bajo el método de Miller & Miller fueron 1,3,5-trinitrobenceno (58), 2,4,6-trinitrotolueno (0,99), 2,4-dinitrotolueno (1,31), 2,6 dinitrotolueno (0,86), 2-nitrotolueno (0,32), 3-nitrotolueno (0,35), 4-nitrotolueno (0,61), difenilamina (3,3), etilcentralita (1,8), nitroglicerina (2,4), PETN (5,7), RDX (92) y tetril (14).

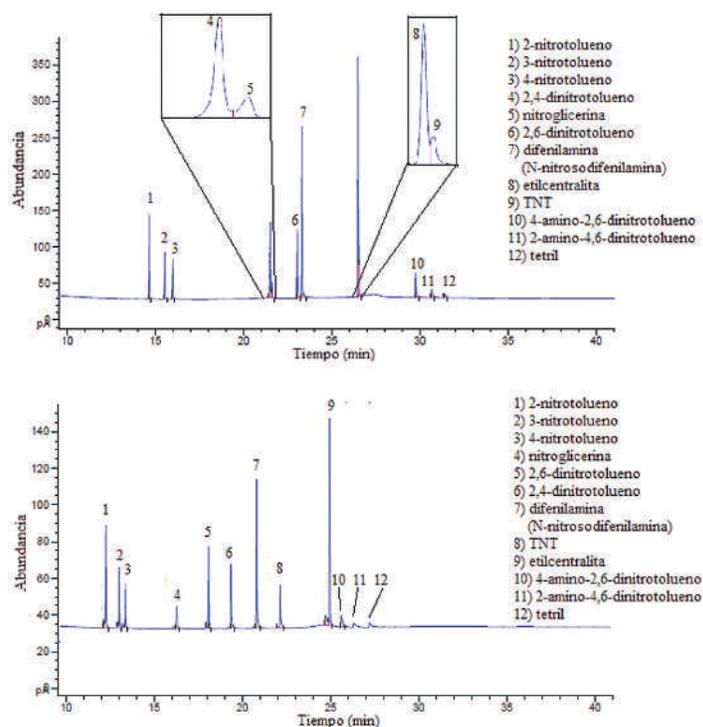


**Figura 2.** Cromatograma de iones totales de la mezcla GC-MS-2 a 10 mg/L, en cada componente.

La repetibilidad del tiempo de retención se determinó midiendo la variabilidad de los tiempos de retención dentro de cada una de las tres corridas que se realizaron, para cada una de las cuales se determinaron las desviaciones estándar y los coeficientes de variación de los tiempos de retención de cada analito. La precisión del tiempo de retención de cada analito dentro de una misma corrida fue bastante buena, y se obtuvieron coeficientes de variación entre 0,0012 % y 1,6 % para todos los analitos, como se aprecia en el anexo I. Esto contrasta con la variabilidad entre corridas, pues se obtuvieron coeficientes de variación entre 0,0028 % y 2,4 % (expresados como límites de repetibilidad). Las precisiones alcanzadas en estas condiciones se utilizaron para establecer las ventanas de detección ampliadas como  $\pm 2$  veces la desviación estándar entre las tres corridas, tal como se muestra en el anexo I. Estos resultados satisfacen lo que tradicionalmente es aceptado como variabilidad máxima en este tipo de determinaciones ( $\pm 2$  % o 0,1 min) [12] considerando que durante el período en estudio se realizaron cambios de columna, cortes en columna y procesos de mantenimiento general. Con respecto a la precisión intermedia, esta mide la precisión de un método realizando un análisis sobre una misma muestra en el mismo laboratorio y con el mismo método, pero con distinto analista o en diferentes corridas con períodos distantes entre ellas. En este caso, debido a que no se contó con datos generados por otros analistas, se estimó la precisión intermedia como un límite de repetibilidad entre las tres corridas realizadas.

### Por GC-NPD

Respecto a los resultados obtenidos mediante el método GC-NPD, en la figura 3 se muestran los cronogramas respectivos. Según la figura, el cromatograma con señales obtenidas con el detector NPD1 B, acoplado a una columna capilar J&W 122-0732 con una polaridad de media a baja, presentó una mayor resolución de los picos cromatográficos y en mayor abundancia, pero a la vez produjo dos traslapes: el primero entre el 2,4-dinitrotolueno y la nitroglicerina, y luego entre la etilcentralita y el TNT; el segundo traslape fue de mayor importancia. En el caso de la respuesta cromatográfica para el detector NPD2 A, acoplado a una columna capilar HP-5MS no polar, presentó una mejor separación de los picos cromatográficos; no existieron traslapes entre los analitos evaluados, pero también presentó menor abundancia en comparación con la columna con mayor polaridad. Los tiempos de retención obtenidos para los analitos de la figura 3 se detallan en el cuadro 5.



**Figura 3** Arriba: Cromatograma para una mezcla de analitos a 10 mg/L en el detector NPD1 B, con una columna capilar J&W DB-1701. Abajo: Cromatograma para una mezcla de analitos a 10 mg/L en el detector NPD2 A, con una columna capilar HP-5MS.

En el cuadro 6 se muestran los límites de detección estimados para los analitos en estudio, calculados bajo el método de Miller & Miller, para el procedimiento por GC-NPD.

Según el cuadro 6, si se comparan los resultados de los límites de detección instrumental por el método establecido para los patrones de referencia evaluados por GC-MS, se observa que los valores de los límites de detección son muy diferentes entre el GC-MS y el GC-NPD. Por el método utilizado se obtuvieron límites de detección más altos con el detector MS que con el NPD, que presentó límites de detección mucho menores debido a su alta selectividad. En los cuadros II y III de la sección de anexos, se muestran los resultados obtenidos para la repetibilidad de los analitos evaluados mediante los dos sistemas cromatográficos del GC-NPD. Al igual que

en el GC-MS, las variabilidades alcanzadas con el método propuesto en el detector GC-NPD demostraron la capacidad que tienen los métodos utilizados para mantener unos resultados concordantes y próximos entre sí, con referencia a su valor medio, bajo las mismas condiciones de laboratorio y método y por el mismo analista, en una misma corrida o entre corridas.

**Cuadro 5.** Tiempos de retención promedio estimados por el método establecido para los analitos evaluados por GC-NPD, con doble sistema de columna cromatográfica

Analito	Tiempo de retención Sistema J&W DB-1701 NPD1 B /min	Tiempo de retención Sistema HP-5MS-NPD2 A/min
2-nitrotolueno	14,053	11,781
3-nitrotolueno	14,927	12,465
4-nitrotolueno	15,381	12,864
2,6 dinitrotolueno	20,897	17,545
Nitroglicerina	21,026	15,765
2,4 dinitrotolueno	22,240	18,827
Difenilamina	22,689	20,243
RDX	24,462	24,486
Etilcentralita	25,955,	24,328
2,4,6 trinitrotolueno	26,107	21,781
Tetril	30,614	26,920
4-amino-2,6 dinitrotolueno	29,750	No se determinó.
2-amino-4,6 dinitrotolueno	30,695	No se determinó.

**Cuadro 6.** Límites de detección instrumental por el método establecido en GC-NPD para los analitos evaluados, en ambos sistemas cromatográficos

Analito	Límite de detección estimado <sup>a,b</sup> / mg/L (entre paréntesis la cantidad de ng en columna)	
	Sistema J&W DB-1701 NPD1 B	Sistema HP-5MS-NPD2 A
2,4,6-trinitrotolueno	0,05 (0,10)	0,81 (1,62)
2,4-dinitrotolueno	0,03 (0,06)	0,01 (0,02)
2,6-dinitrotolueno	0,04 (0,08)	0,04 (0,08)
2-nitrotolueno	0,38 (0,76)	0,03 (0,06)
3-nitrotolueno	0,06 (0,12)	0,05 (0,10)
4-nitrotolueno	0,09 (0,18)	0,05 (0,10)
Difenilamina	0,12 (0,24)	0,01 (0,02)
Etilcentralita	0,02 (0,04)	0,02 (0,04)
Nitroglicerina	4,00 (8)	4,00 (8)
RDX	0,17 (1,34)	0,04 (0,08)
Tetril	3,21 (6,42)	3,06 (6,12)

a Corresponde al valor de la concentración del analito en el extracto o la cantidad de nanogramos de analito inyectados en 2µL de extracto.

b Los límites de detección se estimaron según Miller & Miller, excepto para la NG que se estableció según la relación señal/ruido.

### Análisis de muestras reales

Para evaluar el desempeño del método establecido tanto en el proceso de extracción como en la identificación de los componentes explosivos en los indicios post-exposición, se procedió a realizar seis detonaciones de artefactos explosivos improvisados. Para la verificación de la eficiencia en la identificación de los explosivos por GC-NPD, se seleccionaron solo algunas de las muestras que se habían utilizado por GC-MS. En el cuadro 10 se presentan los resultados de dichos análisis (GC-MS) para el artefacto EXPLO-3-PE. El resto de los resultados se muestran en el anexo IV. Para el artefacto EXPLO-1-PE, no se detectó el RDX, al igual que por GC-NPD, lo cual, según Borusiewicz [28], podría estar relacionado con la eficiencia de la detonación, de manera que la cantidad de los residuos de los explosivos sin detonar que dejó la explosión del artefacto estuviera por debajo de los niveles de detección, dependiendo de una serie de parámetros como la forma de la carga, las propiedades y la posición del detonador. No obstante, la condición de mejores límites de detección encontrados por GC-NPD permitió la identificación de RDX en una de las muestras post-exposición del artefacto EXPLO-2-PE (en los dos detectores), mientras que en otra de las muestras solo se detectó RDX en la columna conectada al detector NPD2 A, cuyo límite de detección de RDX fue de un orden de magnitud menor con respecto al del sistema cromatográfico que tiene el detector NPD1 B.

**Cuadro 7.** Resultados del análisis de indicios post-exposición por GC-MS

Artefacto	Sustancia buscada	Sustancia encontrada	Tiempo de retención/(min)	Quality match
EXPLO-3-PE	PETN	2,4-DNT	15,851	97
		TNT	17,880	90
		4-amino-2,6-DNT	20,342	97
		2,6-DNT	14,944	76
		2,6-DNT	14,949	98
		2,4-DNT	15,851	98
		TNT	17,964	90
		4-amino-2,6-DNT	20,324	99
		TNT	17,866	90
		2,6-DNT	14,944	90
	TNT	2,4-DNT	15,851	91
		TNT	17,880	90
		4-amino-2,6-DNT	20,355	97
		2,6-DNT	14,949	98
		2,4-DNT	15,841	96
		TNT	17,858	91
		2,6-DNT	14,949	90
		2,4-DNT	15,851	98
		TNT	17,897	90
		2,6-DNT	14,975	90
2,4-DNT	15,886	96		
TNT	17,827	87		

<sup>a</sup>nd: no detectable

En una de las muestras analizadas por GC-NPD derivadas del explosivo EXPLO-6-PE se verificó la existencia de TNT, cuando en realidad este artefacto explosivo no contenía dicho compuesto; fue la segunda ocasión en este estudio en que se observó una contaminación con TNT, que estuvo como componente mayoritario en las cargas de tres de los seis artefactos explosivos utilizados en esta investigación. Respecto a los resultados obtenidos (algunos se muestran en el cuadro 7 y el anexo IV, respectivamente), se tiene que la totalidad de los análisis realizados indican que fue posible la identificación definitiva de al menos uno de los componentes explosivos en el 66,7 % de los artefactos explosivos detonados (EXPLO-3-PE, EXPLO-4-PE, EXPLO-5-PE y EXPLO-6-PE), tanto por GC-MS como por GC-NPD (doble separación) y TLC. En un 16,7 % de los casos (EXPLO-2-PE) se pudo dar una identificación tentativa, pues solo se contaba con dos resultados de pruebas ortogonales realizadas (GC-NPD con doble sistema de separación y detección), y finalmente en un 16,7 % de las pruebas no fue posible detectar en los restos post-exposición el explosivo utilizado. De esta manera, en un 83 % de los experimentos se demostró la eficacia de la batería analítica utilizada en este caso, como conjunto de pruebas que, con una dependencia de la técnica, pueden sostener un resultado de identificación química por sí mismas de forma independiente, o bien complementarse entre ellas para obtener una categorización de la sustancia explosiva.

## Conclusiones

La separación cromatográfica (procedimiento por GC-MS) de la mezcla GC-MS-1 presentó una distribución de picos cromatográficos bien resueltos para todos los componentes; su aparición se inició a los 13 minutos y continuó hasta antes de completar los 21 minutos; los picos se ubicaron hacia la parte media de la duración total de la corrida cromatográfica.

Mediante el método por GC-MS se logró una separación cromatográfica de cada uno de los analitos incluidos en la mezcla GC-MS-1, según sus tiempos de retención, excepto de la difenilamina y la N-nitrosodifenilamina, porque ambas sustancias coeluyen y las bibliotecas espectrales utilizadas identifican la señal obtenida únicamente como difenilamina.

Los límites de detección instrumental por el método establecido para los patrones de referencia evaluados por GC-MS oscilan en el rango de 0,32 mg/L a 58 mg/L. El menor límite de detección corresponde al analito 2-nitrotolueno y el mayor límite de detección a RDX.

Mediante el método por GC-MS se obtuvo una precisión del tiempo de retención bastante buena para cada analito dentro de una misma corrida y los coeficientes de variación de los analitos se ubicaron en un rango de 0,0012% a 1,6%".

Respecto al método por GC-NPD, el cronograma con señales obtenidas con el detector NPD1 B, acoplado a una columna capilar J&W 122-0732 con una polaridad de media a baja, presentó mayor resolución de los picos cromatográficos y mayor abundancia de estos con respecto al detector NDP2 A.

Los valores de los límites de detección fueron muy diferentes entre el GC-MS y el GC-NPD. Se obtuvieron límites de detección más altos con el MS que con el NPD, que presentó límites de detección mucho menores debido a la alta selectividad de este detector.

De forma similar que por el GC-MS, la variabilidad alcanzada con el método propuesto por el GC-NPD demostró la capacidad de los métodos utilizados para mantener unos resultados concordantes y próximos entre sí con referencia a su valor medio, bajo las mismas condiciones de laboratorio y método y por el mismo analista, en una misma corrida o entre corridas.

Para el caso particular de la muestra real EXPLO-1-PE, no se detectó RDX (mediante las técnicas GC-NPD y GC-MS), lo cual pudo estar relacionado con la eficiencia de la detonación,

de manera que la cantidad de los residuos de los explosivos sin detonar que dejó la explosión del artefacto estuviera por debajo de los niveles de detección.

La condición de mejores límites de detección encontrada en el método por GC-NPD permitió la identificación de RDX en una de las muestras post-exposición del artefacto EXPLO-2-PE (en los dos detectores), mientras que en otra de las muestras solo se detectó RDX en la columna conectada al detector NPD2 A, cuyo límite de detección de RDX fue de un orden de magnitud menor con respecto al del sistema cromatográfico con el detector NPD1 B.

La totalidad de los análisis realizados indican que fue posible la identificación definitiva de al menos uno de los componentes explosivos en el 66,7 % de los artefactos explosivos detonados (EXPLO-3-PE, EXPLO-4-PE, EXPLO-5-PE y EXPLO-6-PE), tanto por GC-MS como por GC-NPD (doble separación).

En un 16,7 % de los casos (EXPLO-2-PE), se pudo realizar una identificación tentativa, pues solo se contaba con dos resultados de pruebas ortogonales (por GC-NPD con doble sistema de separación y detección). En un 16,7 % de las pruebas (por ambos métodos) no fue posible detectar en los restos el explosivo utilizado.

La batería analítica establecida para la determinación de explosivos por GC-MS y GC-NPD, resultó bastante eficaz en el análisis de los indicios post-exposición (83 %), en la identificación de al menos un componente explosivo en las muestras derivadas de la detonación controlada de artefactos explosivos improvisados con cargas detonantes o deflagrantes de composición conocida.

## Referencias

- [1] J. Akhavan, *The Chemistry of Explosives*, 2nd ed. London: RSC, 2004, pp. 21-27, 149.
- [2] R. Meyer, J. Köhler, A. Homburg, Eds. *Explosives*, 6th ed. Germany: WILEY-VCH Verlag, 2007, pp. 131-132.
- [3] A. Beveridge, Ed., *Forensic Investigation of Explosions*, 2nd ed., (International Forensic Science and Investigations Series). U.S.A.: CRC Press, 2011, pp. 4-23.
- [4] S. Venugopalan, *Demystifying explosives: Concepts in high energy materials*. Rusland: Elsevier, 2014, pp. 1-14.
- [5] T. Urbanski, *Chemistry and technology of explosives*, vol. 1. Poland: Pergamon Press, 1964, pp 1-6, 248-255, 268-285.
- [6] P. Warey, Ed., *New research on hazardous materials*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2007, pp 371-373.
- [7] "Explosives analysis in the environment," in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, vol. 3, John Wiley & Sons Ltd. U.S.A., 2006, pp. 2402-2403.
- [8] M. Peterson, "TNT and 4-amino-2,6-dinitrotoluene influence on germination and early seedling development of tall fescue", in *Elsevier*, 93, 1995, pp. 57-58.
- [9] A. Hewitt, T. Jenkins, and T. Ranney, "On-site gas chromatographic determination of explosives in soils", in *Field analytical chemistry and technology*, vol. 5, 2001, pp. 228-229.
- [10] US Environmental Protection Agency, "Method 8515: Colorimetric screening method for trinitrotoluene (TNT) in soil." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8515.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [11] US Environmental Protection Agency, "Method 8510: Colorimetric screening procedure for RDX and HMX in soil." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8510.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [12] US Environmental Protection Agency, "Method 4050: TNT explosives in soil by inmunoassay." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8510.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [13] US Environmental Protection Agency, "Method 4051: Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in soil by inmunoassay." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8510.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).

- [14] US Environmental Protection Agency, "Method 8330A: Nitroaromatics and nitramines by high performance liquid chromatography (HPLC)." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8330a.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [15] US Environmental Protection Agency, "Method 8330B: Nitroaromatics, nitramines, and nitrate esters by high performance liquid chromatography (HPLC)." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/pdfs/8330b.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [16] US Environmental Protection Agency, "Method 8095: Explosives by Gas Chromatography." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8095.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [17] US Environmental Protection Agency, "Method 529: Determination of explosives and related compounds in drinking water y solid phase extraction and capillary column gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)." <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8095.pdf>. (Recuperado el 26 de julio de 2015).
- [18] W. Schade, R. Orghici, M. Mordmüller, and U. Willer, *Detection of explosives*. U.S.A.: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, pp. 195-196.
- [19] R. Varga, and P. Ulbrich, "Some experience with trace analysis of post-explosion residues." *Arms Technology*, no. 3, 2004, p. 634.
- [20] E. B. Byall, "Detection and characterization of explosives and explosive residue: A review," in *13th INTERPOL Forensic Science Symposium*, 2001, pp. 100-106.
- [21] D. Royds, S. Lewis, and A. Taylor, "A case study in forensic chemistry: The Bali bombings," *Talanta*, no. 67, 2005, pp. 262-268.
- [22] R. Garrido, "Uso de la espectrometría de movilidad iónica como técnica de vanguardia en los laboratorios analíticos de rutina", Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, Argentina, 2012, pp. 25-33.
- [23] C. L. Rhykerd, D. W. Hannum, D. W. Murray, and J. E. Parmeter, "Guide for the selection of commercial explosives detection systems for Law enforcement applications", National Institute of Justice, U.S.A., 1999, pp. 10-20.
- [24] J. Miller, *Estadística y quimiometría para Química Analítica*, 4ª ed. España: Pearson Education, 2002, pp. 125-126.
- [25] D. Skoog, F. Holler y A. Nieman, *Principios de análisis instrumental*, 5.ª ed.. España: McGraw-Hill, 2003, pp. 103-104.
- [26] J. Thurman, *Practical Bomb Scene Investigation*. Canada: CRC Press, 2006, pp. 187-190.
- [27] P. R. Underhill and M. F. Bardon, "Modelling of thermal ignition of RDX/HTPB based PBXS", Royal Millitary Coll of Canada, Canada, 1996, pp. 50-57.
- [28] R. Borusiewicz, G. Zadora, and J. Zieba-Palus, "Chemical analysis of post explosion samples obtained as a result of model field experiments," *Talanta*, no. 116, 2013, pp. 630-636.
- [29] E. Stashenko y J. Martínez, "GC y GC-MS: configuración del equipo versus aplicaciones", *Scientia Chromatographica*, n.º 2, 2010, pp. 49-50
- [30] Wada Laboratory Committee, "Identification criteria for qualitative assays incorporating column chromatography and mass spectrometry", Wada Technical Document – TD2010IDCR, version number: 1.0, approved by: WADA Executive Committee, approval date: 8 May, 2010, effective date: 1 September, 2010.

**ANEXO I.** Estudio de la repetibilidad en la determinación de explosivos y sustancias relacionadas por GC-MS

Analito	Tiempo de retención promedio de cada corrida (min)			Tr promedio (min)	Coeficiente de variación dentro de las corridas (%)			Coeficiente de variación entre corridas (%) expresado como límite de repetibilidad <sup>a</sup>	Ventana de detección <sup>b</sup> (min)
	Tr <sub>1</sub> (n=15)	Tr <sub>2</sub> (n=15)	Tr <sub>3</sub> (n=15)		CV <sub>1</sub>	CV <sub>2</sub>	CV <sub>3</sub>		
2,4-DNT	15,965	16,113	16,034	16,037	0,0027	0,0030	0,0017	0,0028	15,889-16,185
2,6-DNT	15,068	15,211	15,131	15,137	0,0030	0,0026	0,0024	0,0030	14,993-15,280
2-NT	10,865	11,014	10,938	10,939	0,0080	0,0062	0,020	0,014	10,790-11,088
3-NT	11,423	11,574	11,298	11,432	0,0051	0,0042	0,015	0,010	11,155-11,708
4-NT	11,680	11,831	11,755	11,755	0,0037	0,0053	0,012	0,0091	11,604-11,906
DPA	16,987	17,136	17,053	17,059	0,0012	0,0037	0,0023	0,0034	16,909-17,208
EC	19,943	20,089	20,007	20,013	0,0043	0,0013	0,0026	0,0035	19,867-20,159
NG	13,744	13,875	13,801	13,807	0,0053	0,00079	0,0069	0,0065	13,675-13,938
PETN	11,712	12,609	12,534	12,285	1,6	0,0058	0,0051	2,4	11,290-13,280
RDX	NSD <sup>c</sup>	19,859	19,776	19,818	NSD	0,012	0,040	0,032	19,700-19,935
Tetril	21,587	21,618	NSD	21,603	0,078	0,0041	NSD	0,058	21,559-21,646
TNB	17,888	18,183	NSD	18,036	0,13	0,0042	NSD	0,092	17,618-18,453
TNT	17,984	18,085	18,001	18,023	0,063	0,0029	0,0021	0,048	17,915-18,131

<sup>a</sup> Expresada como 2,83 veces el coeficiente de variación entre corridas que corresponde al límite de repetibilidad

<sup>b</sup> Definida como ( $\pm 2s$ ) con la desviación estándar entre corridas

<sup>c</sup> NSD: no se determinó

**ANEXO II.** Estudio de la repetibilidad en la determinación de los explosivos y las sustancias relacionadas con el sistema J&W DB-1701-NPD1 B del GC-NPD

Analito	Tiempo de retención promedio de cada corrida (min)			Tr promedio (min)	Coeficiente de variación dentro de las corridas (%)			Coeficiente de variación entre corridas (%) expresado como límite de repetibilidad <sup>a</sup>	Ventana de detección <sup>b</sup> (min)
	Tr <sub>1</sub> (n=15)	Tr <sub>2</sub> (n=15)	Tr <sub>3</sub> (n=15)		CV <sub>1</sub>	CV <sub>2</sub>	CV <sub>3</sub>		
2,4-DNT	22,640	22,315	22,304	22,420	0,12	0,0045	0,0054	0,14	22,038-22,802
2,6-DNT	21,085	20,782	20,770	20,879	0,0047	0,0038	0,0058	0,0058	20,522-21,236
2-NT	14,237	13,970	13,953	14,053	0,0070	0,014	0,0057	0,0092	13,735-14,371
3-NT	15,113	14,842	14,827	14,927	0,0066	0,013	0,0081	0,011	14,606-15,249
4-NT	15,566	15,297	15,281	15,381	0,0064	0,013	0,012	0,013	15,061-15,702
DPA	22,901	22,581	22,585	22,689	0,017	0,120	0,0053	0,15	22,322-23,057
EC	26,129	25,873	25,863	25,955	0,0038	0,0039	0,0043	0,0040	25,653-26,257
NG	21,246	20,925	20,909	21,026	0,0094	0,0048	0,0048	0,0058	20,647-21,406
RDX	NSD <sup>c</sup>	25,955	22,969	24,462	NSD	0,0037	0,024	0,018	20,238-28,686
Tetril	30,890	30,459	30,492	30,614	0,016	0,0066	0,016	0,015	30,133-31,094
TNT	26,248	NSD	25,966	26,107	0,0076	NSD	0,0069	0,0072	25,707-26,506

<sup>a</sup> Expresada como 2,83 veces el coeficiente de variación entre corridas que corresponde al límite de repetibilidad

<sup>b</sup> Definida como ( $\pm 2s$ ) con la desviación estándar entre corridas

<sup>c</sup> NSD: no se determina

**ANEXO III.** Estudio de la repetibilidad en la determinación de explosivos y sustancias relacionadas con el sistema HP-5MS-NPD2 A del GC-NPD

Analito	Tiempo de retención promedio de cada corrida (min)			Tr promedio (min)	Coeficiente de variación dentro de las corridas (%)			Coeficiente de variación entre corridas (%) expresado como límite de repetibilidad <sup>a</sup>	Ventana de detección <sup>b</sup> (min)
	Tr <sub>1</sub> (n=15)	Tr <sub>2</sub> (n=15)	Tr <sub>3</sub> (n=15)		CV <sub>1</sub>	CV <sub>2</sub>	CV <sub>3</sub>		
2,4-DNT	18,944	18,763	18,774	18,827	0,049	0,0053	0,0053	0,052	18,624-19,030
2,6-DNT	17,672	17,478	17,486	17,545	0,0085	0,0057	0,0057	0,0093	17,326-17,765
2-NT	11,885	11,704	11,701	11,763	0,013	0,017	0,0085	0,017	11,553-11,974
3-NT	12,637	12,305	12,452	12,465	0,011	0,016	0,016	0,016	12,132-12,797
4-NT	12,984	12,805	12,801	12,863	0,070	0,016	0,016	0,080	12,654-13,072
DPA	20,398	20,158	20,171	20,242	0,028	0,005	0,0099	0,021	19,972-20,512
EC	24,476	24,250	24,258	24,328	0,092	0,0041	0,0041	0,11	24,072-24,584
NG	15,891	15,678	15,570	15,713	0,066	0,36	0,019	0,44	15,386-16,040
RDX	24,660	NSD <sup>c</sup>	24,312	24,486	0,069	NSD	0,10	0,097	23,994-24,978
Tetril	27,080	26,781	26,898	26,920	0,058	0,019	0,026	0,043	26,618-27,221
TNT	21,979	21,638	17,355	20,324	0,035	0,014	0,029	0,030	13,785-26,863

<sup>a</sup> Expresada como 2.83 veces el coeficiente de variación entre corridas que corresponde al límite de repetibilidad

<sup>b</sup> Definida como ( $\pm 2s$ ) con la desviación estándar entre corridas

<sup>c</sup> NSD: no se determina

**ANEXO IV.** Resultados del análisis de indicios post-explosión por GC-MS.

Artefacto	Sustancia buscada	Indicio	Sustancia encontrada	Tiempo de retención/(min)	Quality match
EXPLO-3-PE	PETN TNT	EXPLO-3-PE-1	2,4-DNT	15,851	97
			TNT	17,880	90
			4-amino-2,6-DNT	20,342	97
		EXPLO-3-PE-2	2,6-DNT	14,944	76
			2,6-DNT	14,949	98
			2,4-DNT	15,851	98
		EXPLO-3-PE-3	TNT	17,964	90
			4-amino-2,6-DNT	20,324	99
			TNT	17,866	90
		EXPLO-3-PE-4	2,6-DNT	14,944	90
			2,4-DNT	15,851	91
			TNT	17,880	90
		EXPLO-3-PE-5	4-amino-2,6-DNT	20,355	97
			2,6-DNT	14,949	98
			2,4-DNT	15,841	96
		EXPLO-3-PE-6	TNT	17,858	91
			2,6-DNT	14,949	90
			2,4-DNT	15,851	98
		EXPLO-3-PE-7	TNT	17,897	90
			2,6-DNT	14,975	90
			2,4-DNT	15,886	96
EXPLO-3-PE-8	TNT	17,827	87		
	2,6-DNT	14,944	98		
	2,4-DNT	19,851	96		
EXPLO-3-PE-9	TNT	17,919	90		
	2-amino-4,6-DNT	20,842	90		
		TNT	17,911	90	

Continúa...

Continuación

EXPLO-4-PE	RDX TNT	EXPLO-4-PE-1	TNT	17,831	91
		EXPLO-4-PE-2	2,6-DNT	14,949	90
			2,4-DNT	15,851	96
			TNT	17,919	90
			4-amino-2,6-DNT	20,784	90
			RDX	19,736	< 50
		EXPLO-4-PE-3	2,6-DNT	14,953	98
			2,4-DNT	15,851	94
			TNT	17,919	90
			RDX	19,736	< 50
		EXPLO-4-PE-4	2,6-DNT	14,962	98
			2,4-DNT	15,864	98
		EXPLO-4-PE-5	TNT	17,995	90
			TNT	17,822	91
		EXPLO-4-PE-6	2,6-DNT	14,975	98
			2,4-DNT	15,855	97
			TNT	17,897	90
		EXPLO-4-PE-7	2,6-DNT	14,975	98
			2,4-DNT	15,873	97
TNT	17,897		90		
EXPLO-4-PE-8	TNT	17,822	90		
EXPLO-4-PE-9	TNT	17,813	90		
	RDX	19,643	< 50		
EXPLO-5-PE	PETN TNT	EXPLO-5-PE-1	TNT	17,836	91
		EXPLO-5-PE-2	2,6-DNT	14,953	98
			2,4-DNT	15,855	97
			TNT	17,942	90
EXPLO-5-PE	PETN TNT	EXPLO-5-PE-3	2,6-DNT	14,958	98
			2,4-DNT	15,855	97
			TNT	17,919	90
		EXPLO-5-PE-4	TNT	17,836	91
		EXPLO-5-PE-5	nd <sup>a</sup>	nd	nd
		EXPLO-5-PE-6	nd	nd	nd
EXPLO-6-PE	NG EC	EXPLO-6-PE-1	Etilcentralita	19,812	99
			Nitroglicerina	13,680	< 50
		EXPLO-6-PE-2	Etilcentralita	19,816	90
			Etilcentralita	19,807	99
		EXPLO-6-PE-3	Nitroglicerina	13,720	< 50
			nd	nd	nd
		EXPLO-6-PE-4	nd	nd	nd
		EXPLO-6-PE-5	Etilcentralita	19,807	97
		EXPLO-6-PE-6	Nitroglicerina	13,654	< 50
			Etilcentralita	19,812	99
EXPLO-6-PE-7	Nitroglicerina	13,676	< 50		
	Etilcentralita	19,807	99		
EXPLO-6-PE-8	Azufre	21,124	95		
	Nitroglicerina	13,861	< 50		
		Etilcentralita	19,829	93	

<sup>a</sup>nd: no detectable

Nota: Los indicios hacen referencia a la cantidad de los fragmentos post-exposición de cada artefacto. Por ejemplo, el artefacto denominado "EXPLO-3-PE" se fragmentó en 8 indicios identificados como EXPLO-3-PE-1, EXPLO-3-PE-2, EXPLO-3-PE-3, EXPLO-3-PE-4, EXPLO-3-PE-5, EXPLO-3-PE-6, EXPLO-3-PE-7 y EXPLO-3-PE-8.

# Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos

Indirect methodology for life-span estimation of power transformers from the evaluation of its dielectric materials

Luis Diego Acuña-Barrantes<sup>1</sup>, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez<sup>2</sup>

Acuña-Barrantes, L; Gómez-Ramírez, G. Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 45-56.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4485>



1 Estudiante de Ingeniería en Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: luis.acba9@gmail.com

2 Profesor Escuela de Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

## Palabras clave

Aceite dieléctrico; papel dieléctrico; degradación; Furaldehídos; grado de polimerización.

## Resumen

Una adecuada y confiable operación de los transformadores de potencia en las redes eléctricas constituye un factor determinante en la continuidad de servicio, lo cual justifica su atención en la evolución de su integridad, definida sobre todo por su sistema dieléctrico compuesto principalmente por papel – aceite. La investigación se centró en el análisis de pruebas químicas aplicadas a un grupo de transformadores de potencia de 10 MVA con distintos periodos de operación y su correlación con el envejecimiento real estimado por el Grado de Polimerización (GP) y el 2-furaldehído (2-FAL), además de pruebas de esfuerzo mecánico al papel dieléctrico. Los esfuerzos medidos en el papel dieléctrico presentaron una reducción de 74.49 % respecto al valor mínimo establecido por la IEC (80 MPa) y un GP aproximado de 88.4. Las condiciones operativas de cada transformador junto con el porcentaje de humedad del papel dieléctrico, los gases totales y de Oxígeno medidos en ppm, permitieron estimar el 2-FAL de forma indirecta. Los resultados aproximados del Grado de Polimerización fueron suficientes para su evaluación como condición “levemente envejecida”. De modo que, la aproximación de la vida útil residual máxima resultó ser de 27 años. Dicha estimación es congruente con los bajos niveles de gases combustibles medidos (menores a 700 ppm) y de Oxígeno.

## Keywords

Dielectric oil; dielectric paper; degradation; Furaldehyde; degree of polymerization.

## Abstract

An adequate and reliable operation of the power transformers in the electrical networks constitutes a determining factor in the continuity of service, which justifies its attention in the evolution of its integrity, defined by its dielectric system mainly conform by oil and paper. The research focused on the analysis of chemical tests applied to a group of 10 MVA power transformers with different periods of operation and their correlation with the actual aging estimated by the Degree of Polymerization (DP) and 2-furaldehyde (2-FAL), in addition to mechanical stress tests applied to the dielectric paper. This stress, measured in the dielectric paper, presented a reduction of 74.49% with respect to the minimum value established by the IEC (80 MPa) and a DP of 88.4. The operating conditions of each transformer along with the percentage of humidity of the dielectric paper, the total and Oxygen gases measured in ppm, allowed the estimation of 2-FAL indirectly. The approximate results of the Degree of Polymerization were enough for its evaluation as a “slightly aged” condition. So, the approximation of the maximum life-span was 27 years. This estimate is consistent with the low levels of measured combustible gases (less than 700 ppm) and Oxygen.

## Introducción

El sistema dieléctrico en un transformador de potencia es el más sensible al deterioro y degradación, por lo cual es importante monitorear su evolución bajo las condiciones operativas [1]. El proceso de envejecimiento del papel dieléctrico es esencialmente una despolimerización o ruptura de cadenas celulósicas [2], causadas por efectos de humedad, temperatura y oxígeno presente en su ambiente, en este caso el aceite dieléctrico. Uno de sus mecanismos es la hidrólisis, donde el rompimiento de las cadenas de celulosa por da

lugar a 3 moléculas adicionales de agua, además de CO y CO<sub>2</sub> [2]. Además de disminuir sus propiedades mecánicas, la despolimerización se considera un proceso autocatalítico debido a la sinergia entre el agua y compuestos ácidos que dan como producto de reacción la liberación de moléculas de agua por cada unidad monosacárida de la cadena principal de Hemicelulosa [3]. Respecto a la oxidación, este proceso tiene lugar a bajas temperaturas (entre 30-120° C) donde el oxígeno disuelto en el papel, activa las cadenas radicales junto con catalizadores como trazas metálicas o compuestos oxidables. Estos últimos son altamente reactivos en presencia de oxígeno. Su terminación es causada por una recombinación de especies radicales en cetonas y alcoholes [1]. Conforme se aumenta la temperatura, la pirólisis incrementa la cinética de reacción a temperaturas de envejecimiento más altas, lo que ocasiona un incremento gradual en su viscosidad como resultado de reacciones de policondensación. Los precipitados de este tipo de reacción son los lodos, los cuales son insolubles en el aceite [1]. La degradación del aceite dieléctrico, por otro lado, se da principalmente por oxidación. Al reaccionar en presencia de este elemento, se producen hidrocarburos de naturaleza oxidativa al contener este elemento [4], los cuales debido al contacto con el papel dieléctrico provocaran efectos negativos similares a los lodos. Estos precipitados se depositan en las bobinas, canales de refrigeración o en porosidades del papel dieléctrico y afectan la capacidad de transferencia de calor. Igualmente, comprometen la rigidez dieléctrica de los aislamientos al formar especies cargadas que, gracias a su alta polaridad, tienden a alinearse bajo campos eléctricos externos y favorecen el paso de cargas eléctricas (fugas o arcos internos). La combinación de factores que atenten directamente la integridad dieléctrica son los candidatos por excelencia para la detonación de fallas catastróficas en transformadores de potencia. Debido a su impacto tanto económico, ambiental o de servicio dentro de una red eléctrica, el uso de técnicas preventivo-predictivas en mantenimiento han permitido controlar las variables que afectan directamente el equipo ante la detección temprana las fallas incipientes [5]. Los métodos indirectos implementados al papel-aceite dieléctrico son los más utilizados como fin de estimación de su valor de vida. Numerosos estudios han identificado que el deterioro del transformador de potencia se atribuye también a un deterioro de las propiedades mecánicas, en este caso del papel [6]. Esto argumenta la necesidad de conocer la calidad e integridad del aislante sólido por medio de su valor de Grado de Polimerización (GP) [3]. El valor promedio del número de anillos de Glucosa (moléculas de C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>) representa el GP, que durante el envejecimiento tiende a disminuir debido al rompimiento de cadenas [3] [7]. Para el papel nuevo se consideran entre los 1300 a 1100 GP donde por lo general, tiende a disminuir a 950 una vez preparado el transformador para operar por primera vez (debido al proceso de vacío) [9]. Valores entre los 400 hasta 251 GP son considerados como el inicio de un envejecimiento crítico debido a la directa proporción existente a este punto entre las propiedades mecánicas y el Grado de Polimerización [9] [10]. La importancia de estas mediciones es su correlación con los productos de descomposición característicos de compuestos celulósicos, como los contenidos de Furanos o Furfural. El 2-furfural (2-FAL) ha mostrado una dependencia directa con las incisiones moleculares del papel y por medio de modelos matemáticos, es posible estimar valores de GP. Parte de las primeras investigaciones como [11], confirmaron la dependencia de la vida residual con la integridad del papel. Con el transcurso de más estudios en este campo, se evidenció que con la determinación del Grado de Polimerización (GP) fue posible modelar la evolución de su integridad, donde trabajos como [12] y [6] permitieron definir un límite admisible donde sus propiedades mecánicas no disminuyen drásticamente. Sin embargo, la presencia de factores externos comenzó a tener efecto en el deterioro, por ejemplo, en [13] se determinó que las aproximaciones cinéticas de tasas degradativas requerían considerar la presencia de oxígeno y humedad. De modo que, los avances en el campo como los de [11] [9], identificaron esta variación con la humedad, temperatura y contaminación de su ambiente. Esta correlación fundamentó distintas metodologías indirectas que permitían caracterizar los materiales dieléctricos y su proceso de degradación, algunas como el contenido de Furaldehídos (2-FAL)

en el aceite y su relación con el GP como en [8], la relación de diferentes gases combustibles disueltos en el aceite con las posibles fallas eléctricas internas para el caso de [14] y otras consideraciones como las postuladas en [15]. Las intensivas investigaciones a partir de estos aspectos llevaron al estudio de la cinética de reacción y ser relacionarla con modelos matemáticos de estimación de vida residual. El modelo más utilizado es el de Arrhenius, que en [11] utilizan para la estimación de vida útil residual gracias la proporción inversa que existe con la tasa de reacción, temperatura y energía de activación del proceso de degradación. Por último, varios trabajos han tomado como base los modelos matemáticos anteriores pero ajustados según la presencia de humedad y Oxígeno, por medio de valores exponenciales en la ecuación [10], comprobados y postulados como factores de aceleración por [13]. Actualmente existen múltiples metodologías, aproximaciones y estimaciones, sean complementarias o específicas en el cálculo de vida útil residual, las cuales han sido postuladas, pero no evaluadas en aplicaciones reales. La investigación propuesta permite reunir modelos matemáticos para la estimación de vida útil residual con la inclusión de aspectos operativos y del sistema aceite-papel dieléctrico como indicadores indirectos. Además de predecir la condición remanente del transformador, en términos prácticos resulta ser una metodología versátil y económica al incorporar información de gases disueltos en el aceite, los cuales comúnmente se realizan, y no evaluaciones adicionales para la determinación de los niveles de Furfural. Igualmente, se plantearon pruebas mecánicas de tensión aplicadas al papel dieléctrico con el fin de demostrar el efecto degenerativo operativo y sus consecuencias.

## Metodología

### Esfuerzo de Tensión mecánica

Los ensayos mecánicos de tensión se aplicaron según la norma ASTM D828-16 a dos tipos de muestras de papel dieléctrico tipo Kraft; la primera como referencia (nueva) y la segunda de un transformador de potencia con 16 años de operación continua. Las pruebas se realizaron en el equipo *MTS Bionix Servohydraulic* del laboratorio de Mecánica de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con una celda de carga de 2.5 kN y precarga de 5 N, hasta alcanzar su esfuerzo último.

### Estimación del Grado de Polimerización a partir del ensayo de tensión mecánica

La aproximación del grado de polimerización se efectuó por medio del reordenamiento de la ecuación propuesta por [6]:

$$GP = \frac{3*GP_0}{5} * \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 0.1 \right) \quad (\text{ecuación 1})$$

donde  $\sigma_0$  y  $\sigma$  son los valores de esfuerzo de tensión inicial (80 MPa según [5]) y medido para el valor de  $GP$  respectivamente,  $GP_0$  es el grado de polimerización inicial después del vacío interno en un transformador, con un valor de 950.

### Estimación de vida útil residual de transformadores de potencia

El banco de resultados evaluados proviene de pruebas aplicadas a un grupo de transformadores de potencia monofásicos y trifásicos, todos a diferentes periodos operativos y con potencias nominales superiores a 10 MVA. Tanto las pruebas de gases disueltos como las de contenidos de furanos (2-FAL) disueltos fueron efectuadas según las normas ASTM D3612-02 (2017) y D5837-15 respectivamente.

### Aproximación indirecta del contenido de 2-FAL

La medición indirecta se realizó a partir la ecuación propuesta por [16]:

$$2FAL \text{ [ppm]} = -0,935 + 0,03018 * T + 0,03399 * A + 0,3883 * M + 0,000048 * G_{O_2} - 0,000023 * G_{Total} - 0,000007 * C \quad (\text{ecuación 2})$$

donde  $T$  es la temperatura medida en el aceite dieléctrico en °C,  $A$  son los años de servicio del transformador,  $M$  es el contenido de humedad del papel dieléctrico según las curvas de equilibrio propuestas por [17]. Los términos  $G_{O_2}$  y  $G_{Total}$  son los contenidos de oxígeno y gases disueltos totales (ppm) respectivamente y  $C$  es la capacidad del transformador en kVA.

### Estimación del Grado de Polimerización

La evaluación del grado de polimerización del papel dieléctrico se basó en la ecuación propuesta por [18], en función del contenido de Furfural disuelto en el aceite dieléctrico:

$$GP_0 = \frac{8,88 * GP}{8,88 + 2FAL} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde  $GP$  es el valor inicial después del acondicionamiento del transformador (950) y  $2FAL$  es el valor de 2-furaldehído obtenido tanto por el método directo como el aproximado, en ppm.

### Periodo de envejecimiento del transformador de potencia

El modelo matemático para la vida útil residual se basó en el periodo de envejecimiento ( $P.E$ ) propuesto por [19]:

$$P.E = \frac{\frac{1}{GP_t} - \frac{1}{GP_0}}{A * 81760} * e^b \text{ [años]} \quad (\text{ecuación 4})$$

donde  $GP_t$  es el grado de polimerización crítico con valor de 200,  $GP_0$  es el grado de polimerización estimado,  $b = \frac{E_a}{RT}$ : donde  $E_a$  es la energía de activación del proceso oxidativo del aceite dieléctrico regenerado (111 kJ/mol),  $R$  es la constante de gases ideales,  $T$  es la temperatura en K medida en el aceite  $A$  una constante de unidad de tiempo (horas) en función del contenido de oxígeno disuelto en el aceite (ppm) y de humedad en equilibrio (fracción decimal) del papel tipo kraft, calculado por las ecuaciones del cuadro 1.

**Cuadro 1.** Valores ecuaciones para el valor de  $A$ .

Nivel de Oxígeno	$A$ según el contenido de humedad "w"
Bajo (<7000 ppm)	$A = (1,78 \times 10^{12})w^2 + (1,10 \times 10^{10})w + 5,28 \times 10^7$
Medio (7000-16500 ppm)	$A = (2,07 \times 10^{12})w^2 + (5,61 \times 10^{10})w + 2,31 \times 10^8$
Alto (>16500 ppm)	$A = (2,29 \times 10^{12})w^2 + (9,78 \times 10^{10})w + 3,86 \times 10^8$

Fuente: Ecuaciones propuestas basadas en [13].

## Vida útil residual

Una vez obtenido el periodo de envejecimiento del papel dieléctrico, la vida útil residual ( $N$ ) se determinó como:

$$N = 35 - P.E \text{ [años]} \text{ (ecuación 5)}$$

El número 35 se tomó como referencia de la vida útil establecida por los fabricantes de transformadores de potencia bajo condiciones nominales operativas.

## Resultados

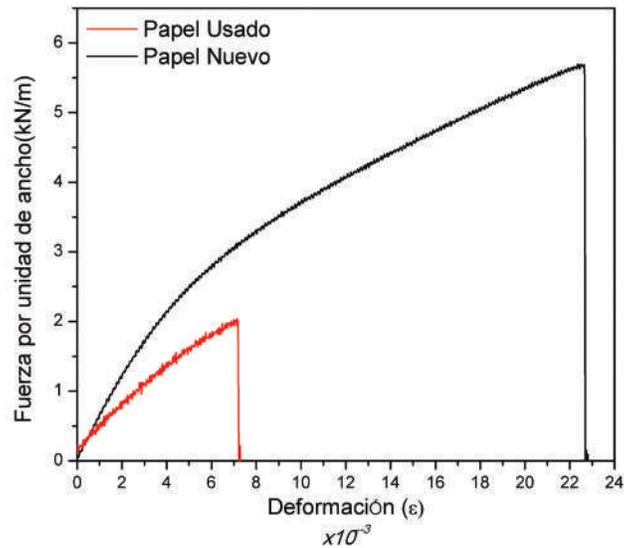
### Ensayos mecánicos de tensión

A nivel general, las diferencias físicas entre las dos muestras de papel dieléctrico eran notables incluso antes de ser ensayadas, lo cual muestra grado de deterioro físico del papel dieléctrico usado por su color mucho más oscuro y translucido. Aun cuando ambas pruebas se efectuaron bajo las mismas condiciones, la diferencia en la forma de ruptura fue notable. La probeta de papel nueva siguió una dirección de fractura perpendicular a la fuerza aplicada, cualidad característica y esperada para tales condiciones. Debido a la naturaleza interfibril existente, los esfuerzos mecánicos del papel dieléctrico a su inicio de su vida recaen directamente en sus de Hemicelulosa y los distribuyen mejor a lo largo de la cadena molecular principal. En cambio, la muestra deteriorada no mostró un comportamiento similar, ya que su dirección de ruptura continuó la forma de arrollamiento de los conductores. A raíz de su fatiga mecánica, estas zonas demuestran una alta afinidad de fragilización donde a nivel molecular, las incisiones en la cadena principal son mayores y su grado de polimerización es menor, reflejado en su disminución de esfuerzos medidos (ver cuadro 2 y figura 1).

**Cuadro 2.** Resultados obtenidos del ensayo mecánico de tensión.

Probeta	Esfuerzo último (MPa)	% de Reducción	GP estimado
Nuevo	56.94	28.83	348.70
Usado	20.41	74.49	88.43

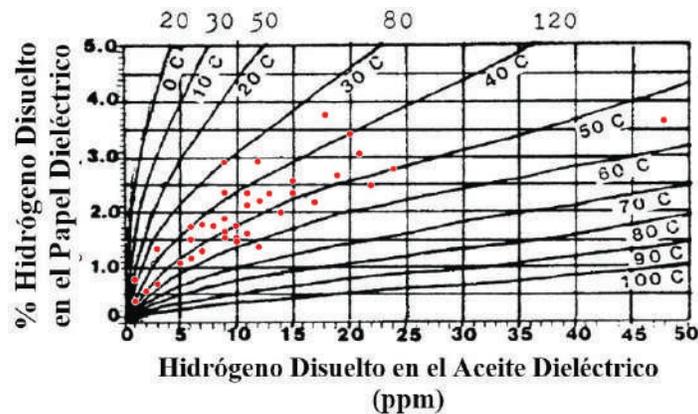
La probeta de papel nueva presentó mejores respuestas mecánicas respecto a la del papel usado, pero no las esperadas para su condición. Si bien su grado de polimerización estimado aún se encuentra en un rango operativo [8] y su porcentaje de reducción aún no es objeto de análisis al no haber alcanzado un valor de disminución del 50%, condición de rechazo por la IEC, es probable que sea el inicio de un deterioro crítico incipiente. La razón de tal situación tiene explicación por su condición de almacenamiento. Un mal control ambiental provoca la aceleración del proceso degradativo por su alto grado higroscópico. La hidrólisis provoca rupturas homolíticas en cadenas más pequeñas y la disminución del grado de polimerización. Esto sumado con los altos niveles de humedad locales, aportan a la reducción de la respuesta mecánica junto con el deterioro operativo normal. Por otro lado, el papel usado mostró una reducción del 74.49% de su esfuerzo de tensión y un grado de polimerización crítico de 88.43. Estas características son suficientes para demostrar la deficiente condición de dicho papel. Si bien las pruebas mecánicas aplicadas al papel brindan información valiosa de la condición del transformador de potencia, su carácter invasivo lo hace impráctico en este tipo de tecnologías dieléctricas.



**Figura 1.** Curvas obtenidas de ensayos de tracción para ambas muestras de papel dieléctrico basadas en datos de investigación. Fuente: Resultados obtenidos de investigación.

### Contenido de gases disueltos

Los transformadores de potencia mostraron un contenido de gases totales promedio de 83139 ppm, donde el 18.06% y 0.02% representaron el Oxígeno e Hidrógeno disuelto respectivamente. Los bajos niveles de Hidrógeno señalan una excelente hermeticidad de la parte activa con la intemperie, cualidad reflejada igualmente en las curvas de equilibrio de humedad (ver figura 2), estimadas de [17].



**Figura 2.** Puntos experimentales del contenido en equilibrio de agua en el papel dieléctrico estimados por la aplicación web WebPlotDigitizer y las curvas de [17].

Además de su baja naturaleza de solubilidad en el aceite (ver cuadro 3), el origen del contenido de Hidrógeno se deriva del mecanismo de degradación molecular en el aceite, por la producción de 2 moléculas de agua (humedad) en cada incisión homolítica. Esta consideración se correlaciona con el contenido de Oxígeno, debido a que este supera su límite de solubilidad solo en 2.06% (309.31 ppm). Los niveles de exceso no son los suficientes para considerar una aceleración del proceso oxidativo normal en el aceite, el cual se incrementa exponencialmente

a partir de un excedente en 2000 ppm. De modo que, los resultados comparados con el cuadro 3, determinan un deterioro normal en el aceite y baja producción de humedad interna, congruente igualmente a una buena hermeticidad.

**Cuadro 3.** Gases producidos por falla en el transformador

Gas	Solubilidad <sup>2</sup>	Rango de Supervisión (ppm)		
		Normal	Precaución	Alerta
H <sub>2</sub> <sup>1</sup>	7.0%	<100	100-700	>700
N <sub>2</sub>	8.6%			
CO <sup>1</sup>	9.0%	<350	350-570	>570
O <sub>2</sub>	16.0%			
CH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	30.0%	<120	120-400	>400
CO <sub>2</sub>	120.0%			
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <sup>1</sup>	280.0%	<65	65-100	>100
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>1</sup>	280.0%	<50	50-100	>100
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>1</sup>	400.0%	<2	2-5	>5
<sup>1</sup> Gases Combustibles				
<sup>2</sup> Solubilidad a 101.33 kPa y 25 °C				

Fuente: Datos obtenidos basados en [4].

El contenido de gases combustibles disueltos en el aceite trabaja es el parámetro de evaluación más utilizado por la atención especial de su evolución durante el periodo operativo del transformador. El cuadro 4 resume el 75% de las mediciones de gases combustibles disueltos del grupo de transformadores analizados.

**Cuadro 4.** Valores medidos del contenido gases combustibles.

Gas	75% (ppm)	Condición
Hidrógeno	16	Normal
Monóxido de Carbono	506.5	Precaución
Metano	15.5	Normal
Etano	2	Normal
Etileno	11.5	Normal
Acetileno	0	Normal

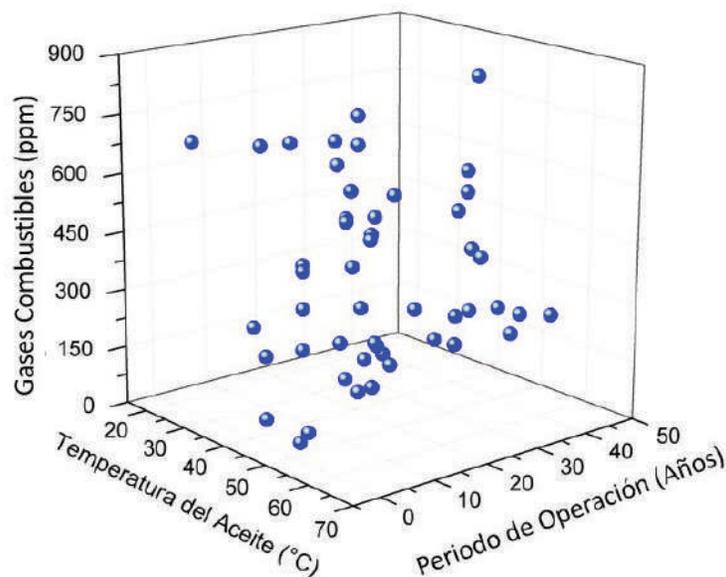
Fuente: Resultados obtenidos de investigación.

Es notable como, casi todos se encuentran en una situación de deterioro normal excepto el Monóxido de Carbono. La variación en el gas combustible sugiere problemas incipientes de descargas parciales, sobrecarga u operación en caliente del transformador, condiciones que favorecen la descomposición de celulosa (papel dieléctrico) y consecuentemente el incremento en los contenidos de Monóxido como producto de reacción. Lo anterior coloca en evidencia el efecto de la carga de trabajo y deterioro operativo que sufre el sistema dieléctrico en los transformadores, reflejado igualmente por la distribución de la figura 3. Los altos contenidos de gases preponderan en periodos extremos (entre 10-15 años y 30-45 años), lo cual se relaciona

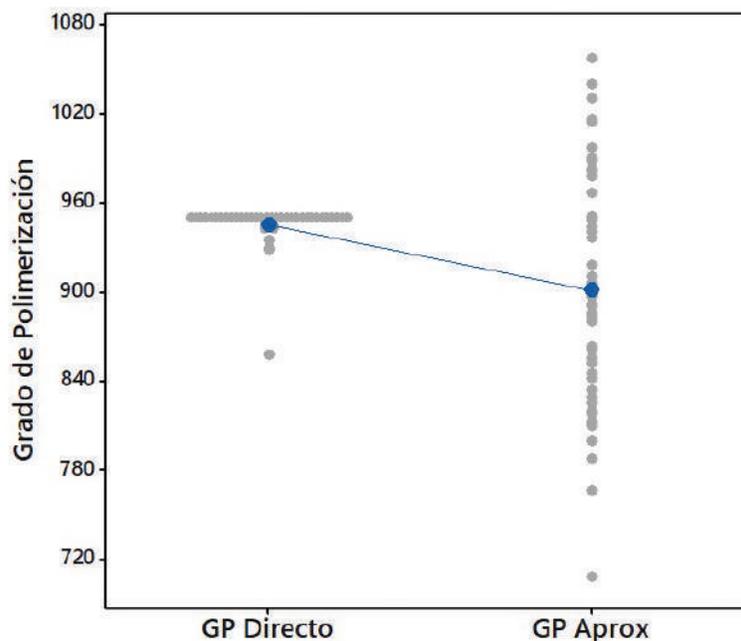
con la forma de probabilidad de fallo característica en los transformadores (forma de tina de baño). Asimismo, el incremento cinético y agilización de las reacciones de degradación fruto del aumento de temperatura, es evidente en la tendencia de formación de gases a mediciones superiores a los 40° C. No obstante, la buena condición inclusive en equipos con periodos de operación superiores a los de vida útil estándar definido por los fabricantes (35 años), reafirman el impacto que conlleva un correcto mantenimiento durante su operación. Los bajos niveles de 2-FAL medidos, 0.0448 ppm, determinan una excelente condición (según [18]) y un bajo deterioro polimérico de la celulosa, con valores de GP aproximados de 660.

### Grado de Polimerización

Las estimaciones del grado de polimerización para las mediciones directas e indirectas del 2-FAL fueron superiores a 857.84 y 708.6 respectivamente. En la figura 4 se muestra el resumen de ambas aproximaciones, donde es apreciable la diferencia de variabilidad. En vista a lo anterior, es de esperar que el cálculo con las mediciones de Furaldehídos normadas sean las más precisas pero en términos prácticos, la aproximación resulta ser una opción viable si se consideran aspectos logísticos del mantenimiento. Al tomar en cuenta el carácter no invasivo de la toma de muestras de aceites en los transformadores, el no intervenir directamente las partes activas reduce su contacto con la intemperie y mantiene invariable sus condiciones operativas. De igual forma, los costos asociados para el calculo del 2-FAL de forma directa son mayores a los de gases disueltos, principalmente en los consumibles, equipos y operación adicional requerida. Usualmente en las valoraciones del aceite dieléctrico se realizan análisis químicos de gases disueltos por medio de cromatografía de gases, en cambio, los furaldehídos por su solubilidad en el aceite y baja volatilidad, son medidos por cromatografía líquida de alta precisión. El valor agregado de la medición indirecta no solo permite reducir y agilizar los costos asociados, sino también controlar en todo momento la evolución de su condición por medio de la estimación de vida útil restante de los transformadores de potencia. Por lo cual, las medias aritméticas de 945.44 y 901.5 del grado de polimerización para las mediciones directas e indirectas respectivamente aún se encuentran en rangos evaluativos del envejecimiento en el papel dieléctrico (levemente envejecidos), útiles en aspectos ingenieriles para la toma de decisiones.



**Figura 3.** Dispersión de datos de gases combustibles totales para el conjunto de transformadores de potencia estudiados.

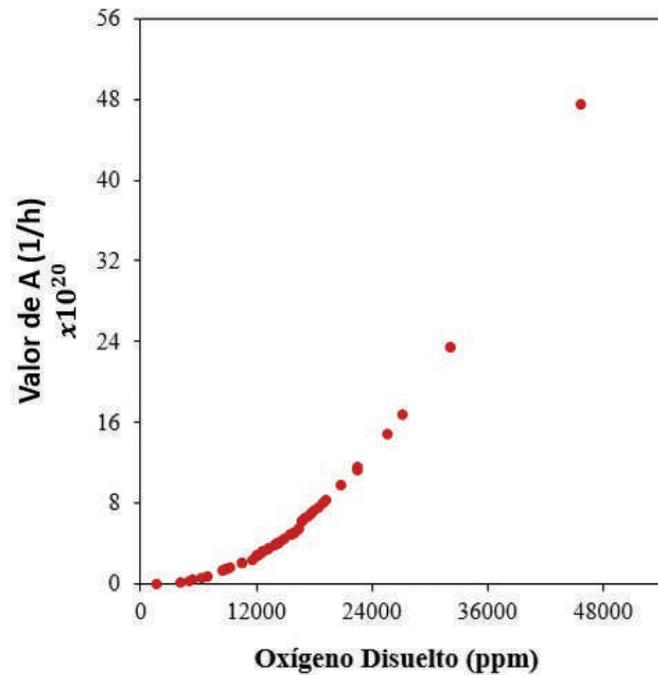


**Figura 4.** Gráfica de valores individuales para ambos métodos y sus respectivas medias aritméticas obtenidas de datos experimentales de la investigación.

#### Estimación de vida útil residual

En cuanto a los periodos residuales estimados con los dos métodos de aproximación del grado de polimerización, se comprobó, por medio de una prueba de t pareada, que hay probabilidad de que no existan diferencias representativas. Gracias al software estadístico MINITAB, la hipótesis alterna planteada, la cual considera diferencias entre los grupos de datos dentro de un intervalo de confiabilidad del 95%, fue rechazada al presentar un valor de p superior al nivel de significancia (0.05). Este método, al demostrar la capacidad de comparar diferentes metodologías a partir de sus resultados, permitió evaluar el alcance de las estimaciones realizadas, aspecto importante al estar respaldado estadísticamente. Esto corrobora la practicidad del uso de indicadores o métodos indirectos en la estimación de vida útil residual, además del alcance del modelo matemático por sus ajustes exponenciales según sus contenidos de humedad y Oxígeno disueltos en las partes activas. Los valores de vida útil residual obtenidos mostraron periodos inferiores a 27 años para el 75 % del conjunto de transformadores analizados, todos razonables para sus altos valores de grado de polimerización (evaluados a partir del 2-FAL).

Sin embargo, algunos transformadores presentaron periodos restantes entre los 5-10 años, esto a los contenidos de Oxígeno, humedad y temperatura medida del aceite dieléctrico. Debido a la incorporación de valores exponenciales que varían según estos elementos, como la variable A, ajustan y modelan las estimaciones matemáticas a condiciones reales cinéticas. La figura 5 muestra la distribución de las variables ajustadas para los transformadores analizados, donde la mayoría se encuentran en rangos de bajos contenidos de Oxígeno. Si bien el grado de polimerización ronda en valores entre 940-960, la presencia o combinación de estos 3 factores en el transformador incrementan la tasa degradativa y reducen su vida útil considerablemente. De modo que, su impacto dentro de un mantenimiento preventivo-correctivo aplicado a estos equipos, permiten no solo asegurar su operación confiable dentro de su ciclo de servicio, sino prolongar y maximizar su uso, bajo un monitoreo de su evolución.



**Figura 5.** Valores de A en función del contenido de Oxígeno disuelto en el aceite y Humedad en equilibrio del papel dieléctrico de los transformadores analizados.

## Conclusiones

El papel dieléctrico usado mostró un esfuerzo de tensión menor al nuevo, con un valor de 20.41 MPa. Lo anterior se atribuye al rompimiento homolítico de cadenas unitarias las cuales no actúan como una sola y disminuyen sus prestaciones mecánicas. En cuanto a la muestra de papel dieléctrico nuevo, aun cuando presentó una reducción en su esfuerzo de tensión de solo el 28.83% respecto a los valores estandarizados por la IEC, el grado de polimerización aproximado (348.70) comprueba el posible inicio de un deterioro crítico. Los bajos contenidos medidos de Hidrógeno disueltos en el aceite dieléctrico señalan la hermeticidad en los transformadores, donde su origen se explica por el mecanismo de deterioro del aceite dieléctrico en condiciones normales de envejecimiento. De igual forma el contenido de Oxígeno disuelto reafirmó dicha condición de deterioro la cual, a pesar de encontrarse en mayor proporción a su solubilidad (incremento de 309.31 ppm), su exceso no es suficiente para acelerar la degradación del aceite dieléctrico. La baja producción de gases combustibles generados acredita la buena condición en el sistema dieléctrico, junto con los insuficientes niveles de 2-furfural obtenidos (contenido medio de 0.0448 ppm) que puedan ser relacionados con una alta degradación de la celulosa inclusive a largos periodos operativos. Es así como el grado de polimerización estimado en ambos métodos fue superior a 708.6, condición que se relaciona con un leve deterioro en el dieléctrico sólido. Si bien estadísticamente los datos obtenidos por las diferentes metodologías de estimación del grado de polimerización mostraron cierto nivel de variabilidad, para efectos prácticos en estudios de la condición de los transformadores son suficientes, ya que ambos casos se encuentran dentro del mismo rango evaluativo reportado en investigaciones similares (útil para la toma de decisiones futuras). Finalmente, el 75% de los transformadores presentaron una vida útil residual máxima de 27 años según el método matemático de envejecimiento utilizado. Dicho modelo demostró su capacidad de cálculo para cualquiera de los dos procesos de aproximación del grado de polimerización sin alguna diferenciación estadística relevante.

## Referencias

- [1] R. Polansky et al, "Comparison of the mineral oil lifetime estimates obtained by differential scanning calorimetry, infrared spectroscopy, and dielectric dissipation factor measurements," *Thermochimica Acta*, vol. 647, pp. 86-93, 2017.
- [2] A. Moreno Villa, "Estandarización E Implementación De La Norma ASTM D-4243 Para La Determinación Del Grado De Polimerización Del Papel Eléctrico (Nuevo Y Usado) Como Aislante En Transformadores De Potencia Por El Método Del Promedio Viscosimétrico;" , Universidad Tecnológica de Pereira.
- [3] Margalló Gasco, "Diagnóstico Del Consumo De Vida De Un Transformador a Través Del Análisis De Compuestos Furánicos.," 2012.
- [4] H. M et al, *Guía Para El Mantenimiento Del Transformador*. (3era ed ed.) Estados Unidos: Transformer Maintenance Institute, 2005.
- [5] R. Córdoba Salazar, "Desarrollo De Un Programa De Mantenimiento Basado En Confiabilidad Para Transformadores De Potencia.," Universidad de Costa Rica, 2006.
- [6] M. Emsley et al, "Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 4: Effects of ageing on the tensile strength of paper," *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, (6), pp. 285-290, 2000.
- [7] D. J. T. Hill et al, "A study of degradation of cellulosic insulation materials in a power transformer. Part 2: tensile strength of cellulose insulation paper," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 49, (3), pp. 429-435, 1995.
- [8] C. Homagk, K. Mossner and T. Leibfried, "Investigation on degradation of power transformer solid insulation material," in Oct 2008.
- [9] G. Jiménez-Araya and G. A. Gómez-Ramírez, "Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas," *Revista Tecnología En Marcha*, vol. 29, (3), 2016.
- [10] M. Emsley, "Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers," *IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 141, (5), pp. 324, 1994.
- [11] Gholami, M. Mirzaie And H. R. Tayebi, "Insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing tests," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 17, (1), pp. 39-54, 2009.
- [12] D. J. T. Hill et al, "A study of degradation of cellulosic insulation materials in a power transformer. Part 2: tensile strength of cellulose insulation paper," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 49, (3), pp. 429-435, 1995.
- [13] D. Martin et al, "An Updated Model to Determine the Life Remaining of Transformer Insulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, (1), pp. 395-402, 2015.
- [14] Johana Tatiana Sarria-Arias, Natalia Andrea Guerrero-Bello and Edwin Rivas-Trujillo, "Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia," *Revista Facultad De Ingeniería*, vol. 23, (36), pp. 105-122, 2014.
- [15] W. Flores et al, "Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte II. Correlación entre resultados de ensayos físico-químicos," *IEEE Latin American Transactions*, vol. 5, (8), 2007.
- [16] Hillary, W. D. A. G et al, "A tool for estimating remaining life time of a power transformer," in May 2017.
- [17] T. V. Oommen, "Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems," in Oct 1983.
- [18] F. Ortiz et al, "Estimating the age of power transformers using the concentration of furans in dielectric oil," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pp. 1011-1015, May 2016.
- [19] R. A. Prasojo et al, "Transformer Paper Expected Life Estimation Using ANFIS Based on Oil Characteristics and Dissolved Gases (Case Study: Indonesian Transformers)," *Energies*, vol. 10, (8), pp. 1135, 2017.

# Efecto de la aplicación de aire caliente humidificado como tecnología poscosecha en la calidad de la Feijoa

## Effect of application of hot air humidified as post- harvest technology in the quality of Feijoa

David Leopoldo Sánchez-Rubio<sup>1</sup>, Jhon Harrison Pérez-Benavides<sup>2</sup>,  
Claudia Patricia Pérez-Rodríguez<sup>3</sup>

---

Sánchez-Rubio, D; Pérez-Benavides, J; Pérez-Rodríguez, C. Efecto de la aplicación de aire caliente humidificado como tecnología poscosecha en la calidad de la Feijoa. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 57-67.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4371>



- 1 Estudiante de pregrado en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; Facultad de Ingeniería; Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. Correo electrónico: dalsanchezru@unal.edu.co
- 2 Estudiante de postgrado en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; Facultad de Ingeniería; Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. Correo electrónico: jhperez@unal.edu.co
- 3 Profesora asociada. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; Facultad de Ingeniería; Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. Correo electrónico: cpperezr@unal.edu.co

## Palabras clave

Acca sellowiana; tecnologías poscosecha; calidad.

## Resumen

La feijoa (*Acca sellowiana*) es una fruta climatérica exótica de América del Sur, por su atractivo sabor agridulce se ha posicionado tanto en el mercado nacional como internacional. Por este motivo es pertinente avanzar en el desarrollo y aplicación de tecnologías de poscosecha que propendan por su adecuado manejo y conservación. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto en la calidad poscosecha de frutos de feijoa sometidos a una corriente de aire a temperatura de 41°C y HR de 57 % por 2 horas (T1) y por 4 horas (T2). Posteriormente se evaluaron parámetros físico - químicos en el almacenamiento durante dos semanas en condiciones ambientales. Se encontró disminución en la pérdida de peso de los tratamientos frente a control, así como disminución en la contracción del diámetro ecuatorial sin detrimento de parámetros químicos como pH, acidez total titulable (ATT) e índice de madurez (IM). Entre los dos tratamientos, el que presenta mejores condiciones es el T2 (41°C, 57 % HR, por cuatro horas) según parámetros como la pérdida de peso, contracción del diámetro ecuatorial, pH, ATT e IM.

## Keywords

Acca sellowiana; post-harvest technologies; quality.

## Abstract

The feijoa (*Acca sellowiana*) is an exotic climacteric fruit in South America, by its attractive sweet and sour flavor; it has been positioned in the market national as international. For this reason, is relevant to advance in the development and application of post-harvest technologies that foster their appropriate management and conservation. This study had as aim to evaluate the effect on postharvest quality of feijoa fruits subjected to a current air at temperature of 41° C and relative humidity of 57% for 2 hours (T1) and for 4 hours (T2). Subsequently, were evaluated physical and chemical parameters during the storage for two weeks in ambient conditions. Was found decrease in the weight loss of treatments in contrast with the control, also the decrease in contraction of the equatorial diameter without detriment of chemical parameters such as pH, titrable total acidity (ATT) and maturity index (IM). Among the two treatments, the best one is T1 (41° C, 57% HR, for two hours) depending on parameters such as the weight loss and contraction of the equatorial diameter, pH, ATT and IM.

## Introducción

La Feijoa (*Acca sellowiana*) pertenece a familia de las *Mirtáceas* junto con la guayaba. Es originaria del Sur de Brasil, Uruguay, Paraguay y Norte de Argentina. Este fruto es poco conocido en otros países y el que más lo produce para su comercialización es Nueva Zelanda en donde hay alrededor de 500 ha de cultivo. Este fruto puede ser consumido crudo o en dulces, los pétalos de sus flores también son comestibles en ensaladas [1]. Para la región andina colombiana la feijoa es un fruto por explotar para la exportación, presenta adaptabilidad de siembra en zonas con altitudes que comprenden entre los 1.800 a 2.700 msnm, por ejemplo. Es un fruto climatérico con tasas de respiración y producción de etileno bastante altas, por lo que, después de la cosecha el producto naturalmente disminuye considerablemente propiedades

como el peso, pH y la turgencia [2], razón por la cual es pertinente encontrar tecnologías que permitan preservar la calidad del producto durante el almacenamiento y comercialización.

Estos frutos son llamativos por su elación de ácidos y azúcares, por lo cual es importante definir un tratamiento que además de preservar la calidad del producto, permita preservar tales características. En oriente se ha investigado en el uso de tratamientos térmicos para la conservación de productos, alcanzando resultados satisfactorios, en la referencia [3] se indica que para durazno el uso de corrientes de aire humidificado mantuvo sus propiedades químicas y mecánicas, por otro lado, en la referencia [4] se reporta que para habichuela y frijol esta tecnología retrasó la pérdida de peso y preservó la apreciación del sabor y la textura. La implementación de corrientes de aire humidificado puede dar respuestas favorables a la resistencia de daño por frío y al control de la maduración [5].

Este estudio tiene como objetivo evaluar la respuesta en el almacenamiento de los frutos de feijoa al exponerse previamente a corrientes de aire humidificado, esta evaluación se realiza mediante el seguimiento de la pérdida de peso, propiedades mecánicas y fisicoquímicas, se espera que este trabajo sienta bases para la implementación de tecnologías de bajo costo para estos productos.

## Metodología

Esta investigación se realizó en el 2016 en el laboratorio de poscosecha del campus de la Universidad Nacional de Colombia, coordenadas 4°38'08"N 74°04'58"O en la ciudad de Bogotá. Los frutos se cosecharon en su madurez fisiológica en el municipio de Tibasosa (Boyacá, Colombia) a 2.538 msnm. Las muestras fueron seleccionadas y clasificadas en un arreglo aleatorio, posteriormente fueron lavadas, desinfectadas con hipoclorito de sodio (NaClO) en una inmersión de 25 ppm, seguido de una inmersión en agua con el fin de eliminar los excesos de NaClO.

Se establecieron tres tratamientos: a) Tratamiento control (TC), b) Tratamiento 1 (T1): Corriente de aire humidificado a 41°C y 57 % de humedad relativa por 2 horas y c) Tratamiento 2 (T2): Corriente de aire humidificado a 41°C y 57 % de humedad relativa por 4 horas. Los frutos de feijoa fueron dispuestos en bandejas enmalladas por donde se pasó la corriente de aire caliente humidificado en un psicrómetro, que permitía el control de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

Posteriormente fueron almacenadas por 12 días a condiciones ambiente (20°C y 49% de humedad relativa) de humedad relativa. Se realizaron análisis de laboratorio de Porcentaje de pérdida de peso, índice de color interno (IC-I), índice de color externo (IC-E), porcentaje de contracción del diámetro ecuatorial, intensidad respiratoria (IR), carga máxima, deformación, trabajo, carga final, sólidos solubles totales (SST), pH, acidez total titulable (ATT) e índice de madurez (IM), durante dos semanas, tomando datos por triplicado.

Los equipos usados para tomar las mediciones fueron (ver figura 1): Una balanza con precisión 0,001 Kg para la pérdida de peso, la medición de los IC interno e IC externo se realizaron con un colorímetro digital "Konica Minolta CR-410" que tiene coordenadas del modelo cromático CIELab\*, un pie de rey de 0,01 mm de precisión para determinar el diámetro ecuatorial, para la IR se usaron sensores infrarrojos "Vemier" en cámaras de respiración de 2L obteniéndose registros en ppm de la concentración de CO<sub>2</sub>, en cuanto a la consistencia para determinar la carga máxima (Kgf/cm<sup>2</sup>), deformación (mm), trabajo (mJ) y la carga final (gf) se midieron con un analizador de textura "Brookfield CT3", los SST (°Brix) se midieron con un refractómetro manual óptico "SO-RH", a través del método potenciométrico se midió pH y con un Hidróxido de Sodio a 0,1 N se midió ATT.

El análisis estadístico de los datos se hizo a partir de matrices de correlación de Pearson, análisis de varianzas y medias, análisis de tendencias. Con estos métodos se nota la dependencia o variación de la información obtenida y la evaluación del comportamiento de los diferentes tratamientos.



Figura 1. Foto de los equipos.

## Resultados y discusión

Los datos presentaron los estadísticos descriptivos y correlaciones a través de la matriz de Pearson mostrados en los cuadros 1, 2, 3 y 4.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos

	%Perdida de peso	IC EXTERNO	%DE CONTRACCIÓN	TR	Peak Load	Deaf Peak	Work	Final Load	IC Interno	SST	pH	ATT	IM
<b>CONTROL</b>													
Media	10,09495267	-15,2562629	4,320709348	75,8460882	29,7928769	4,421111111	33,952037	92,2962963	-0,36381336	11,41111111	3,74027778	0,10255212	157,530471
DesvTipica	7,206314049	1,01804754	2,75538204	38,9588604	7,8866629	1,05939069	7,09745197	24,5389755	1,93144392	1,01075696	0,64071697	0,07131662	87,6615634
Varianza	51,93096217	1,03642079	7,592130187	1517,7928	62,1994518	1,12230864	50,3738245	602,161317	3,7304756	1,02162963	0,41051824	0,00508606	7684,5497
<b>TRATAMIENTO 1</b>													
Media	8,253227127	-12,6246225	3,572532056	66,796926	31,6000245	4,67916667	33,4311111	89,8842593	0,00112614	11,3083333	3,80111111	0,09646871	153,082903
DesvTipica	6,126074681	1,55763041	2,393085216	49,4795549	9,45145663	0,90748219	6,83952157	32,4563259	1,57795916	0,69231897	0,43437141	0,045243	101,156314
Varianza	37,528791	2,4262125	5,726856849	2448,22635	89,3300324	0,82352392	46,7790553	1053,41309	2,48995511	0,47930556	0,18867852	0,00204693	10232,5999
<b>TRATAMIENTO 2</b>													
Media	8,121715587	-15,6855999	3,051363516	74,8227386	28,4252413	4,98518519	30,3768519	84,7314815	1,33249245	11,125	3,88694444	0,07492682	157,800608
DesvTipica	6,161084055	1,22320759	2,334486377	56,4660163	2,95136807	0,9525707	2,14460465	35,8822262	1,92845607	1,10281206	0,37321935	0,02451027	36,3395201
Varianza	37,95895674	1,49623681	5,449826644	3188,411	8,71057348	0,90739095	4,59932909	1287,53416	3,71894282	1,21619444	0,13929269	0,00060075	1320,56072

**Cuadro 2.** Matriz de Pearson tratamiento control

CONTROL													
Correlaciones													
	Pérdida Peso	IC-E	Contracción	IR	Carga Máx	Deformación	Trabajo	Carga Final	IC-I	SST	pH	ATT	IM
Pérdida Peso	1												
IC-E	,816 <sup>*</sup>	1											
Contracción	,967 <sup>**</sup>	,667	1										
IR	,301	,122	,228	1									
Carga Máx	-,916 <sup>*</sup>	-,620	-,934 <sup>**</sup>	-,157	1								
Deformación	,968 <sup>**</sup>	,731	,931 <sup>**</sup>	,487	-,906 <sup>*</sup>	1							
Trabajo	-,789	-,399	-,902 <sup>*</sup>	-,032	,868 <sup>*</sup>	-,770	1						
Carga Final	-,765	-,544	-,815 <sup>*</sup>	-,186	,674	-,759	,869 <sup>*</sup>	1					
IC-I	,956 <sup>**</sup>	,929 <sup>**</sup>	,862 <sup>*</sup>	,286	-,801	,896 <sup>*</sup>	-,589	-,627	1				
SST	-,365	-,209	-,504	,467	,394	-,257	,741	,751	-,212	1			
pH	,919 <sup>**</sup>	,621	,925 <sup>**</sup>	,231	-,974 <sup>**</sup>	,902 <sup>*</sup>	-,783	-,566	,835 <sup>*</sup>	-,247	1		
ATT	-,928 <sup>**</sup>	-,631	-,980 <sup>**</sup>	-,098	,937 <sup>**</sup>	-,887 <sup>*</sup>	,957 <sup>**</sup>	,864 <sup>*</sup>	-,796	,637	-,886 <sup>*</sup>	1	
IM	,973 <sup>**</sup>	,808	,953 <sup>**</sup>	,300	-,823 <sup>*</sup>	,924 <sup>**</sup>	-,778	-,831 <sup>*</sup>	,936 <sup>**</sup>	-,449	,826 <sup>*</sup>	-,911 <sup>*</sup>	1

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).  
 \*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

**Cuadro 3.** Matriz de Pearson tratamiento 1

TRATAMIENTO 1													
Correlaciones													
	Pérdida Peso	IC-E	Contracción	IR	Carga Máx	Deformación	Trabajo	Carga Final	IC-I	SST	pH	ATT	IM
Pérdida Peso	1												
IC-E	,853 <sup>*</sup>	1											
Contracción	,987 <sup>**</sup>	,803	1										
IR	-,489	-,201	-,527	1									
Carga Máx	-,919 <sup>**</sup>	-,630	-,964 <sup>**</sup>	,643	1								
Deformación	,924 <sup>**</sup>	,654	,944 <sup>**</sup>	-,713	-,969 <sup>**</sup>	1							
Trabajo	-,771	-,553	-,807	,076	,778	-,646	1						
Carga Final	-,610	-,388	-,679	,025	,685	-,502	,960 <sup>**</sup>	1					
IC-I	,987 <sup>**</sup>	,900 <sup>*</sup>	,975 <sup>**</sup>	-,489	-,889 <sup>*</sup>	,887 <sup>*</sup>	-,734	-,589	1				
SST	-,198	-,162	-,058	-,050	-,047	-,121	-,045	-,279	-,119	1			
pH	,852 <sup>*</sup>	,871 <sup>*</sup>	,881 <sup>*</sup>	-,279	-,794	,714	-,759	-,703	,901 <sup>*</sup>	,253	1		
ATT	-,981 <sup>**</sup>	-,916 <sup>*</sup>	-,958 <sup>**</sup>	,349	,857 <sup>*</sup>	-,865 <sup>*</sup>	,762	,589	-,975 <sup>**</sup>	,209	-,879 <sup>*</sup>	1	
IM	,844 <sup>*</sup>	,997 <sup>**</sup>	,799	-,237	-,634	,664	-,517	-,355	,895 <sup>*</sup>	-,124	,874 <sup>*</sup>	-,907 <sup>*</sup>	1

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).  
 \*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

**Cuadro 4.** Matriz de Pearson tratamiento 2.

TRATAMIENTO 2													
Correlaciones													
	Pérdida Peso	IC-E	Contracción	IR	Carga Máx	Deformación	Trabajo	Carga Final	IC-I	SST	pH	ATT	IM
Pérdida Peso	1												
IC-E	,910 <sup>*</sup>	1											
Contracción	,997 <sup>**</sup>	,927 <sup>**</sup>	1										
IR	-,501	-,352	-,507	1									
Carga Máx	-,983 <sup>**</sup>	-,940 <sup>**</sup>	-,979 <sup>**</sup>	,505	1								
Deformación	,513	,184	,506	-,306	-,361	1							
Trabajo	-,684	-,655	-,694	,915 <sup>*</sup>	,731	-,129	1						
Carga Final	,368	,211	,397	-,627	-,247	,625	-,466	1					
IC-I	,905 <sup>*</sup>	,988 <sup>**</sup>	,921 <sup>**</sup>	-,422	-,950 <sup>**</sup>	,163	-,715	,173	1				
SST	-,914 <sup>*</sup>	-,690	-,905 <sup>**</sup>	,515	,846 <sup>*</sup>	-,794	,553	-,466	-,697	1			
pH	,550	,432	,534	-,669	-,622	,170	-,713	-,045	,554	-,568	1		
ATT	-,963 <sup>**</sup>	-,811	-,952 <sup>**</sup>	,573	,951 <sup>**</sup>	-,570	,697	-,304	-,840 <sup>*</sup>	,950 <sup>**</sup>	-,724	1	
IM	,961 <sup>**</sup>	,917 <sup>*</sup>	,948 <sup>**</sup>	-,440	-,990 <sup>**</sup>	,310	-,681	,123	,931 <sup>**</sup>	-,818 <sup>*</sup>	,648	-,941 <sup>**</sup>	1

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).  
 \*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

### Pérdida de peso

Para efectos de la pérdida de peso del producto T1 y T2 (ver figura 2) presentaron una pérdida de peso día del 1,45 y 1,46 (%) en contraste con 1,7 % del TC. En términos de peso T1 y T2 no mostraron diferencias significativas, sin embargo, TC presentó una notoria pérdida peso, coincidiendo con lo reportado en [5]. La pérdida del peso esta correlacionada de manera inversa con ATT hecho que concuerda con el coeficiente de correlación de Pearson para los tres tratamientos [6].

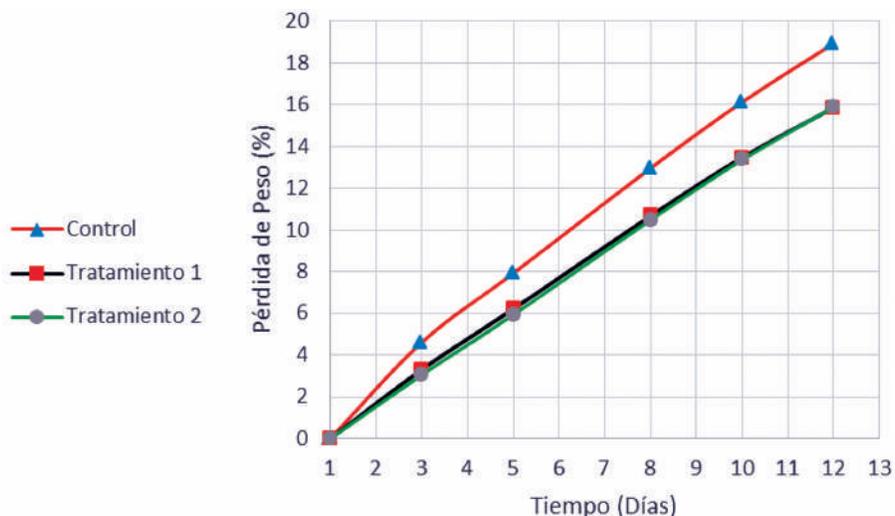


Figura 2. Porcentaje de pérdida de peso.

### IC externo

En cuanto al color externo (ver figura 3) se encontró en la referencia [7], que los valores están entre -15,5 y -13,0; los cuales son próximos a los obtenidos en laboratorio y que oscilan entre -16,8 y -13,7. T1 tuvo diferencias en el índice de color que se pueden traducir en una degradación de la clorofila. Debido a las características del producto el índice de color cambia dentro de los distintos tonos de verde [2].

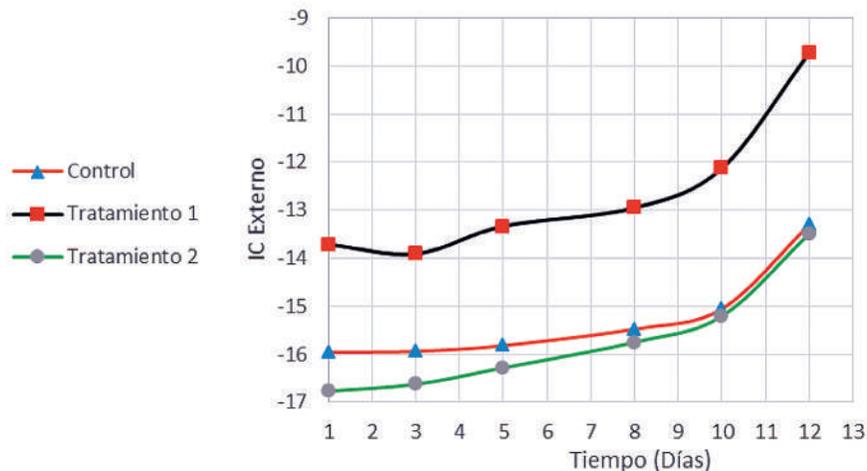


Figura 3. Índice de color externo.

### Intensidad Respiratoria

La guayaba es un producto que presenta producción de CO<sub>2</sub> en concentraciones moderadas, con valores entre 70 y 150 (mg CO<sub>2</sub>/kg.h) [8]. En [2] se reporta una producción de CO<sub>2</sub> entre 17,7 y 166,5 (mg CO<sub>2</sub>/kg.h). De igual manera, se encontró (figura 4) un rango no muy alejado que presenta una producción de CO<sub>2</sub> entre 17,7 y 166,5 de mg CO<sub>2</sub>/kg.h; por lo cual, se puede inferir que este producto presenta altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. En TC se presentó el pico climatérico más alto en comparación con T1 y T2.

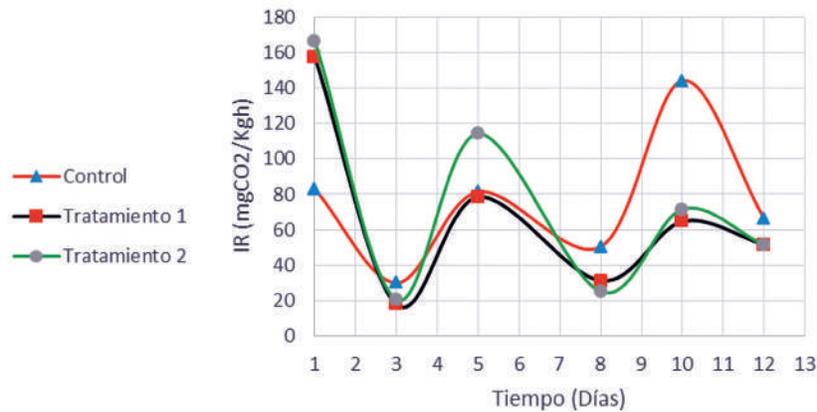


Figura 4. Intensidad respiratoria.

### Porcentaje de contracción del diámetro ecuatorial

El diámetro ecuatorial se reduce en todos los tratamientos ya que tiene una relación directa con la pérdida de peso del fruto según la matriz de Pearson. El T2 mostró una tendencia lineal exceptuando el rango entre los días 8 y 12 que varió moderadamente, este tratamiento tuvo pérdidas diarias aproximadas del 0.5% (ver figura 5). El TC tuvo mayor porcentaje de contracción en comparación a los demás pero a partir del día 8 fue el único que presentó una variación casi constante. En general T2 tuvo menor porcentaje de contracción que TC.

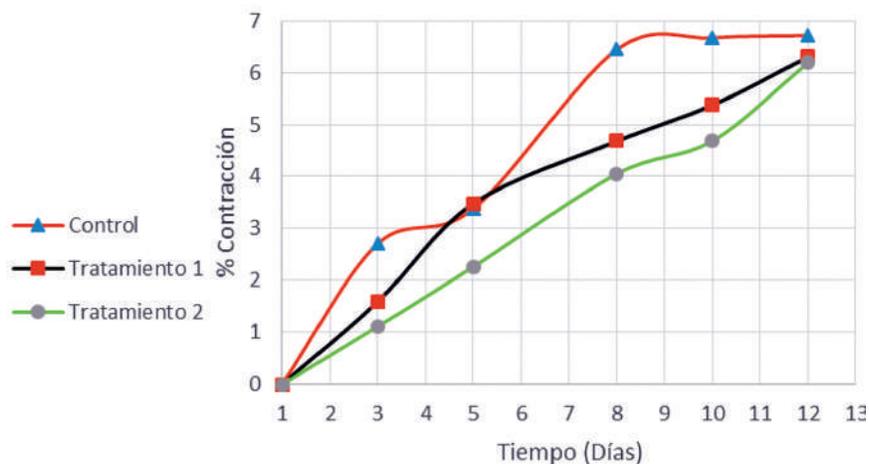


Figura 5. Porcentaje de contracción del diámetro ecuatorial.

### Deformación

Antes de la fractura viene la deformación y la referencia [9] indica que hay un tipo de fractura llamada frágil; la cual, empieza con una pequeña o nula deformación plástica que tiene una absorción baja de energía antes de que se dé la fractura.

En el texturómetro TC presento menores valores de deformación antes de que se fracturara el fruto por penetración, estos valores están entre 2,93 y 5,71 (mm), Entre 3,05 y 5,4 (mm) para T1; 3,97 y 6,38 (mm) para T2 (ver figura 6).

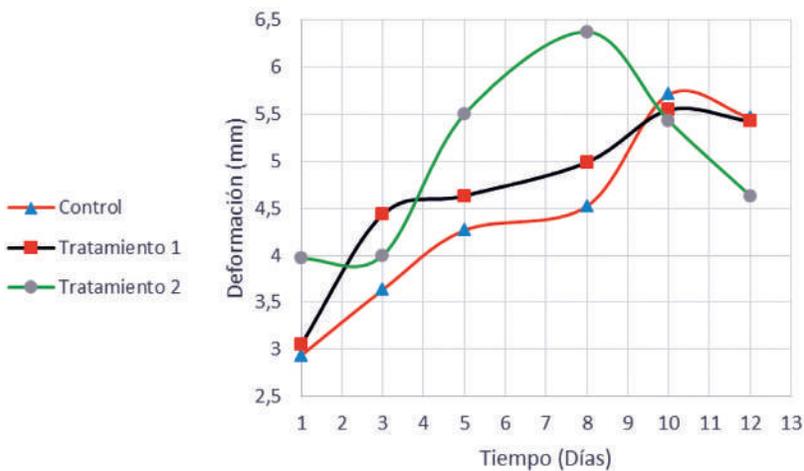


Figura 6. Deformación.

### Sólidos Solubles Totales

Las variaciones en los grados °Brix están asociadas a las tasas respiratorias y esto se puede enlazar con el tipo de comportamiento en TC y T1, sin embargo, la tendencia de T2 presentó una disminución constante de este parámetro [6] (ver figura 7). En [7] se reporta un rango de SST entre 10,84 y 11,45 (°Brix) el cual es cercano al rango 10,2 y 12,85 (°Brix) encontrado en esta investigación. Variedades colombianas de guayaba los SST aumentan con el avance del periodo poscosecha [10].

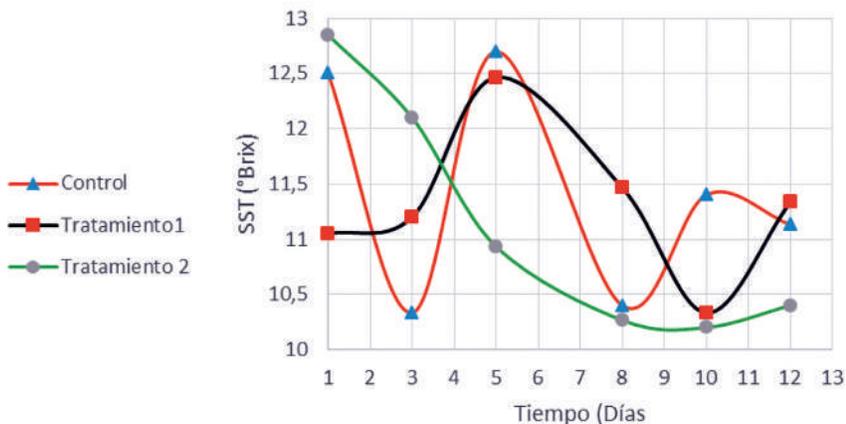
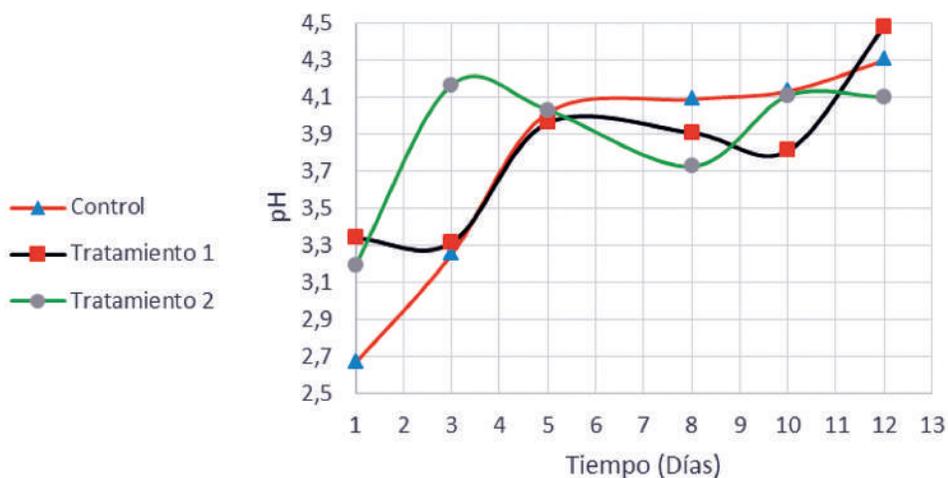


Figura 7. Sólidos Solubles Totales.

## pH

Para los tratamientos se encontró que el pH varía de 2,6 a 4,3 para TC, de 3,34 a 4,48 para T1 y de 3,2 a 4,1 para T2 (ver figura 8). A medida que se desarrolla el producto en poscosecha su pH va en aumento y autores reportan datos de pH entre 3,1 a 3,5 y 2,8 a 3,05 [2]. Aunque en [2] se afirma que la acidez total titulable no tiene una relación clara con el aumento de pH; por el contrario, se encontró una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros según la matriz de Pearson ( $R^2=-88,6\%$  para TC,  $R^2=-87,9\%$  para T1,  $R^2=-72,4\%$  para T2). El pH es un parámetro que ayuda a la estimación de los costos de transformación en procesos industriales [6].



**Figura 8.** Potencial de Hidrógeno (pH) en el transcurso de los días.

## Acidez Total Titulable

Los parámetros ATT y pérdida de peso en la matriz de Pearson presentaron una relación inversamente proporcional muy evidente con valores de  $-92,8\%^{**}$  para TC,  $-98,1\%^{**}$  para T1 y  $-96,3\%^{**}$  para T2, hecho que concuerda con lo reportado en [6], estudio que menciona que existe una correlación inversa entre ATT y la pérdida de peso, IR y los SST y además afirmando que la acidez se reduce en el proceso de maduración. Por el contrario, no se halla concordancia con los parámetros ATT contra la IR y SST, ya que la correlación entre ATT e IR es de:  $-9,8\%$  para TC;  $34,9\%$  para T1 y  $57,3\%$  para T2; en el caso de la correlación ATT y SST es de  $63,7\%$  para TC,  $20,9\%$  & para T1 y  $95\%^{**}$  para T2.

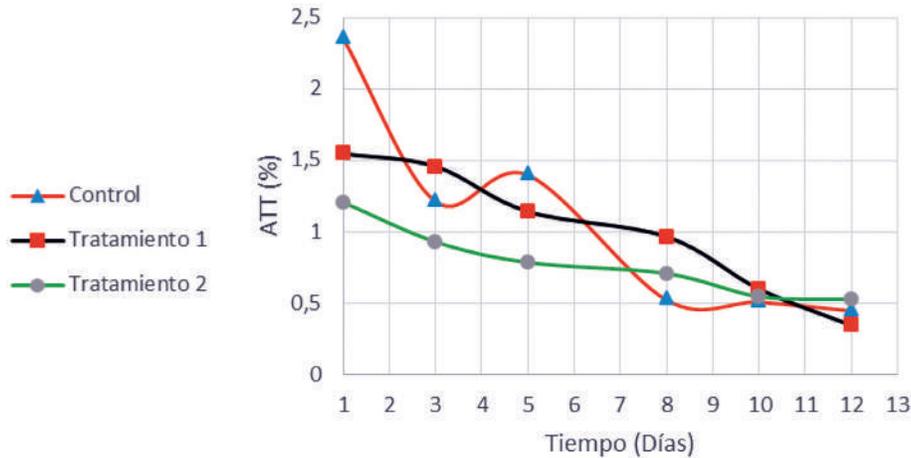
En la referencia [2][11], reportan que los frutos almacenados entre 4 a 23 (°C) reducen la ATT entre 0,3 y 4,3 (%). Hecho que se muestra la figura 9. Con tendencia a reducir los niveles de ATT en un rango entre 0,34 a 2,35 (%).

## Índice de Madurez

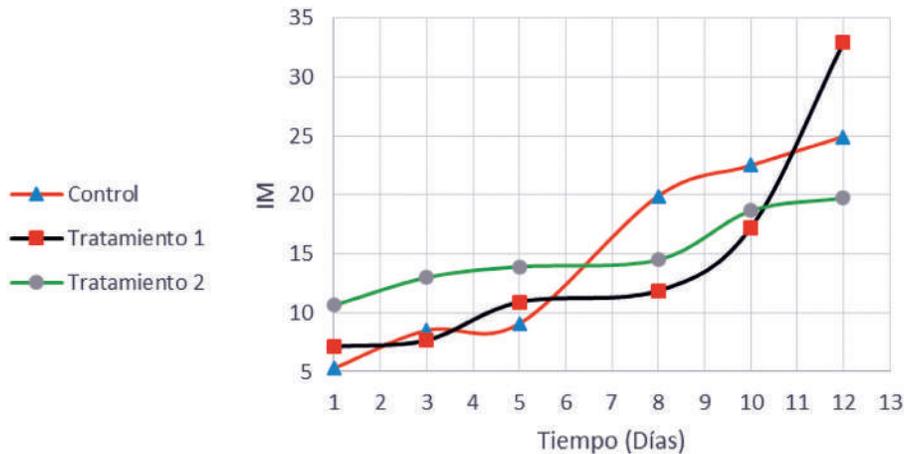
El grado de madurez de los frutos se infiere a través del IM. Los resultados de la figura 10, son evidencia de la relación SST/ATT. En T1 se mantiene un aumento progresivo hasta el día 10 y después presenta un proceso acelerado en el aumento del IM hasta el día 12. T2 muestra una tendencia de aumento moderado durante todo el periodo de tiempo. Se según la matriz de correlación de Pearson el IM es directamente proporcional al IC externo, esto quiere decir que

a medida que el IM aumenta en todos los tratamientos se empieza a llevar a cabo un proceso de desverdizado, es decir, el cambio de color de la piel de verde oscuro a verde claro.

En la referencia [12] al aumentar la temperatura se promueve la maduración y por genética la fruta no cambia su color verde pero si cambia la tonalidad; de manera similar T1 y T2, almacenados a temperatura ambiente constante, el producto varia su tonalidad verde, este comportamiento pudo deberse al efecto de los tratamientos aplicados.



**Figura 9.** Acidez Total Titulable



**Figura 10.** Índice de Madurez

## Conclusiones

En general la muestra de los frutos de Feijoa del T2, que se sometieron a un proceso de humidificación con aire caliente a 41°C y 57% de humedad relativa durante 4 horas, mostraron resultados positivos en comparación con TC y T1. Revelando una menor reducción del porcentaje de pérdida de peso y consecuentemente en el porcentaje de contracción. Estos parámetros son importantes en la comercialización debido a que el peso del producto es un

estimador de su precio. T2 también tuvo aumento moderado en el IM, los frutos soportaron mayores deformaciones antes de poder ser penetrados y presentó los menores valores de desverdización en el IC externo.

Se recomienda hacer un estudio de costos para implementar este proceso de humidificación en empresas que comercialicen Feijoa y también sé que se estudien estas tecnologías de poscosecha variando la temperatura de almacenamiento en refrigeración.

Se espera obtener mejores resultados al tener condiciones de aire caliente humidificado a mayor humedad relativa, lo que permitiría tener un mejor comportamiento de la pérdida de peso y las propiedades fisicoquímicas de los frutos de feijoa.

## Referencias

- [1] Frans Geilfus, *El árbol al servicio del agricultor: Guía de especies - Frans Geilfus - Google Libros*, vol. 2. 1994.
- [2] A. Parra and G. Fischer, "Maduración y comportamiento poscosecha de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). Una revisión.," *CIENCIAS HORTÍCOLAS*, vol. 7, no. 1, pp. 98–110, 2013.
- [3] Zhenzhong. L, Xu. L and Wang. Q, "Effect of hot air treatment on postharvest quality of zhonghuashou peach". *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, Volume 26, Number 1 pp. 375-379, 2010.
- [4] ZHAO Yu-ying; LIU Le-cheng, "Effect of Hot Air Treatment on Storage Quality of Postharvest Cowpea Pod--*Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)* 2015 15," *J. Yangtze Univ. (Natural Sci. Ed., 2015)*.
- [5] G. Soto-Zamora, E. M. Yahia, J. K. Brecht, and A. Gardea, "Effects of postharvest hot air treatments on the quality and antioxidant levels in tomato fruit," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 38, no. 6, pp. 657–663, Sep. 2005.
- [6] M. Rodríguez, H. E. Arjona, and A. Galvis, "Maduración del fruto de feijoa (*Acca sellowiana* Berg) en los clones 41 (Quimba) y 8-4 a temperatura ambiente en condiciones de la Sabana de Bogotá," *Agron. Colomb.*, vol. 24, no. 1, pp. 68–76, 2006.
- [7] R. R. Martínez-Vega, G. Fischer, A. Herrera, B. Chaves, and O. C. Quintero, "Características físico-químicas de frutos de feijoa influenciadas por la posición en el canopi," *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol. 2, no. 1, pp. 21–32, Feb. 2011.
- [8] A. A. Kader and E. M. Yahia, "Postharvest biology of tropical and subtropical fruits," in *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*, vol. 1, Elsevier Ltd., pp. 79–111, 2011
- [9] M. Bourne, *Food Texture & viscosity. Concept and Measurement*. Academic Press, pp. 427, 2002.
- [10] M. E. Solarte, M. Soledad Hernández, A. L. Morales, J. P. Fernández-Trujillo, and L. M. Melgarejo, "Caracterización Fisiológica Y Bioquímica Del Fruto De Guayaba Durante La Maduración," pp. 85-119, 2010.
- [11] A. C. Velho, C. V. T. do Amarante, L. C. Argenta, and A. C. Steffens, "Influência da temperatura de armazenamento na qualidade pós-colheita de goiabas serranas," *Rev. Bras. Frutic.*, vol. 33, no. 1, pp. 14–20, Mar. 2011.
- [12] C. V. T. do Amarante, C. A. Steffens, J. P. H. J. Ducroquet, and A. Sasso, "Qualidade de goiaba-serrana em resposta à temperatura de armazenamento e ao tratamento com 1-metilciclopropeno," *Pesqui. Agropecu. Bras.*, vol. 43, no. 12, pp. 1683–1689, Dec. 2008.

# Techos verdes: una estrategia sustentable

## Green Roofs: a sustainable strategy

Brenda Guadalupe López-González<sup>1</sup>, Alejandro D. Camacho<sup>2</sup>,  
María Concepción Martínez-Rodríguez<sup>3</sup>, Mariana Marcelino-Aranda<sup>4</sup>

López-González, B; Camacho, A; Martínez-Rodríguez, M; Marcelino-Aranda, M. Techos verdes: una estrategia sustentable. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 68-79.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389>

- 1 Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. México.  
Correo electrónico: blopezg1502@alumno.ipn.mx.  
 <https://orcid.org/0000-0001-8076-3785>
- 2 Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México.  
 <https://orcid.org/0000-0003-4791-1912>
- 3 Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. México.  
 <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>
- 4 Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. México. Autor de correspondencia.  
Correo electrónico: mmarcelino@ipn.mx.  
 <https://orcid.org/0000-0003-4997-0617>



## Palabras clave

Techos verdes; urbanización; cambio climático; isla de calor urbana; desarrollo sustentable; antecedentes; beneficios; composición; clasificación.

## Resumen

La urbanización ha traído consigo beneficios que han permitido el crecimiento económico y mejoras en la calidad de vida de las personas, pero también ha abonado a la parte ambiental. Los techos verdes son una tecnología que contribuye al desarrollo sustentable. El presente trabajo da a conocer información relevante acerca del origen, características y beneficios de los techos verdes, así como una recopilación de actividades académicas que diferentes organismos están realizando en pro de esta tecnología verde y, finalmente, los casos éxito en México. Se reportan una serie de beneficios ambientales como la disminución de la contaminación y temperatura del ambiente, beneficios sociales como la reducción de enfermedades y porcentajes de mortandad en la población y beneficios económicos como el ahorro por la disminución del consumo de energía.

## Keywords

Green roofs; urbanization; climate change; urban heat island; sustainable development; background; benefits; composition; classification.

## Abstract

The urbanization of the areas has brought benefits that have allowed economic growth and improvements in the quality of life of people, but has also paid for the environmental part. Green roofs are a technology that contributes to sustainable development. For this reason, the present work discloses relevant information about the origin, characteristics and benefits of green roofs, as well as a compilation of academic activities of different organisms being carried out in favor of this green technology and, finally, successful cases in Mexico. A series of environmental benefits are reported, such as the reduction of pollution and temperature of the environment, social benefits such as the reduction of diseases and mortality percentages in the population and economic benefits such as savings due to the reduction of energy consumption.

## Introducción

El crecimiento demográfico acelerado, derivado del incremento en las tasas de fecundidad y esperanza de vida, ha traído consigo como principal resultado la expansión de la urbanización, pues de acuerdo con el Banco Mundial [1] más del 54% de la población a nivel mundial habita en zonas urbanas y se espera que la tendencia de migración de la población a las ciudades aumente principalmente por la demanda de una mejor calidad de vida de las poblaciones [2].

Con la construcción de ciudades se estima que al año se pierden hasta 13 millones de hectáreas de zonas boscosas. Dicha deforestación es una situación alarmante, pues los bosques albergan más del 80% de las especies de flora y fauna, además de que permiten reducir la degradación ambiental, ayudan a la regulación natural del clima y permiten limpiar el aire [3].

Si bien es cierto, la urbanización ha permitido la industrialización, modernización y la mejora en la calidad de vida de las personas, también la disminución de zonas naturales lo cual ha desencadenado el efecto invernadero de manera forzada, pues al no haber la suficiente flora

para la absorción de gases de efecto invernadero, emitidos por la quema de combustibles y uso desmedido de recursos naturales, causa el incremento del calentamiento global que a su vez provoca el cambio climático y la contaminación ambiental [4].

Con el fin de mitigar los problemas ambientales existentes por la actividad del hombre, diversos países han diseñado estrategias y tecnologías que permiten contribuir a la disminución de los efectos negativos causados [5], pues las ciudades construidas alrededor del mundo no están diseñadas para amortiguar los daños que el cambio climático ha provocado [6]. Dentro de estas tecnologías están aquellas aplicadas a la industria de la construcción denominadas techos verdes.

El presente documento muestra una investigación cualitativa basada principalmente en el análisis de artículos y reviews publicados en revistas científicas de alto impacto sobre los techos verdes. La consulta de información se realizó en bases de datos científicas internacionales como Web of Science y Scopus donde se consideraron documentos publicados entre los años 2014 a 2019 e ingresando palabras clave como green roofs, benefits of green roofs, climate change y sustainable development. Asimismo, el análisis de información publicada en notas periodísticas y aquella emitida en informes de dependencias públicas y organizaciones privadas dedicadas a trabajar con los techos verdes.

## Antecedentes de los techos verdes

En la literatura el primer antecedente de techos verdes que se tiene son los jardines colocados en los templos de las ciudades de los zigurats de la antigua Mesopotamia en el año 600 a.C. [7]. Otra evidencia representativa del surgimiento de los techos verdes son los Jardines Colgantes de Babilonia mandados a construir por el rey Nabucodonosor en los siglos VII y VIII a.C., mismos que fueron considerados una de las siete maravillas del mundo antiguo [8].

En el siglo XX fue introducido por primera vez de manera formal el concepto arquitectónico de techos verdes en Europa, por el arquitecto y teórico de la arquitectura suiza, nacionalizado francés, Charles Édouard Jeanneret-Grisb, mejor conocido en esa época como Le Corbusier, quien realizaba diseños arquitectónicos para la clase alta [9].

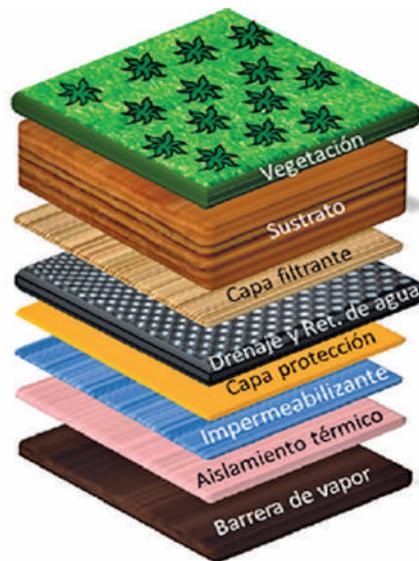
En 1961 se comenzaron a realizar trabajos de investigación sobre los techos verdes, siendo en este mismo año la publicación del trabajo del investigador alemán Reinhard Bornkamm. Además, en 1970 se desarrollaron investigaciones técnicas, principalmente acerca de la estructura y los componentes de los techos verdes [7].

En los años 70s, derivado de la preocupación mundial por el crecimiento demográfico, el incremento desmedido de la contaminación ambiental y los indicios del agotamiento de los recursos renovables y no renovables, la implementación de los techos verdes se popularizó en diferentes países como Alemania, Francia y Suiza como una alternativa para mitigar los daños ocasionados al planeta por la propia actividad del hombre [9].

La organización Green Roofs for Healthy Cities [10] define a los techos verdes como un sistema colocado en el techo de un edificio que funciona como un medio impermeabilizante, de cultivo y plantas. Por su parte Odli et al. [2], los define como un manto con vegetación que crece en el techo de un edificio. También, como un invernadero colocado en la azotea de una construcción que por sus características permite el cultivo de hortalizas para el autoconsumo [11]. Luego entonces, un techo verde puede definirse como una capa de vegetación colocada en los techos de las construcciones, la cual funciona como un medio de cultivo, así como un sistema impermeabilizante que filtra y limpia el agua pluvial y el aire.

## Composición de un techo verde

La composición de un techo verde es de gran importancia, pues de ello dependerá el éxito en el funcionamiento y la vida útil del mismo. Según Morales, Cristancho & Baquero [12], un techo verde está conformado, generalmente, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Composición de un techo verde. Fuente: Morales, Cristancho & Baquero [12]

La primera capa de un techo verde es la de vegetación que es la naturación conformada por plantas adaptables al ambiente. Posterior a ésta se encuentra el sustrato que corresponde a la capa fundamental del sistema pues en él se concentran los nutrientes, el agua y el soporte para la vegetación instalada. En seguida se localiza la capa filtrante la cual tiene como función principal lavar las partículas más pequeñas provenientes del sustrato, evitando así que pasen al drenaje. La siguiente capa es la de drenaje y retención de agua que principalmente recopila el agua suficiente para abastecer a la vegetación. La capa posterior es la de protección que permite proteger la capa de aislamiento térmico. La siguiente capa es la impermeabilizante que evita que se pase el agua que pudiera filtrarse en la capa de drenaje. Posteriormente, está la capa de aislamiento térmico que cumple la función de transportar la carga y de eliminar los puentes térmicos existentes. Finalmente, está ubicada la barrera de vapor que evita el paso del vapor de agua hacia el techo de la construcción.

## Clasificación de los techos verdes

Los techos verdes han sido clasificados, generalmente, en dos grupos, intensivos y extensivos. Como se muestra en el cuadro 1, la clasificación se ha realizado considerando principalmente el espesor de su sustrato, el tipo de vegetación y el propósito de éstos.

Los techos verdes extensivos presentan una mayor demanda de instalación, aproximadamente el 91% de los casos, puesto que requieren menor infraestructura, poco mantenimiento y riego por tener un sustrato de menor espesor y vegetación ligera, lo que permite que los costos de instalación y de mantenimiento sean menores y, además el peso adicional en la construcción donde se instalen es menor en comparación con los de tipo intensivo [12], [17].

**Cuadro 1.** Clasificación de los techos verdes.

Características	Extensivos	Intensivos
Espesor del sustrato	2 cm a 20 cm	> 20 cm
Peso adicional	30 a 220 kg/m <sup>2</sup>	300 a 1500 kg/m <sup>2</sup>
Tipo de vegetación	Musgo, hierba y pasto	Arbustos y árboles pequeños
Uso	Decorativo o cultivo	Recreación
Costo de instalación	\$1,000.00 - \$1,500.00 / m <sup>2</sup>	\$1,200.00 - \$3,500.00 / m <sup>2</sup>
Mantenimiento	Simple	Complejo
Riego	Poco frecuente	Constante
Demanda	Alta	Baja

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Azoteas Verdes [13]; Green Roof for Healthy Cities [10]; Morales Mojica et al. [12]; Norton et al. [14]; Saadatian et al. [15]; Sempergreen [16].

Por otra parte, los techos verdes intensivos al tener una estructura semejante a un jardín convencional tienen un peso más elevado y requieren mayor infraestructura, pues en estos es posible colocar desde arbustos pequeños hasta árboles y equipo más elaborado, pues normalmente son utilizados para fines recreativos. Por lo anterior, la instalación y el mantenimiento tiene un costo elevado, ya que la vegetación instalada requiere constante riego, poda, fertilización y control de plagas para garantizar el buen estado de la misma [12], [15], [17].

## Beneficios de los techos verdes

Teniendo como marco de referencia el paradigma del desarrollo sustentable Desarrollado en el Informe de Brundtland titulado “Nuestro Futuro Común”, publicado por la Comisión Mundial de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo en 1987 [18], fue definido como la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras [19]. Se destaca el primer modelo de desarrollo sustentable que contemplaba tres enfoques principales: desarrollo económico, el desarrollo social y la protección y cuidado del ambiente, dentro de los cuales se señala que es necesario que exista un equilibrio para obtener un desarrollo a largo plazo [20].

Es así como la instalación de techos verdes juega un papel importante por los múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales que proveen. Distintos autores y organizaciones, a través de investigaciones teóricas y prácticas, han demostrado que los techos verdes pueden reducir las escorrentías y el efecto de isla de calor urbano, así como incrementar la vida útil de los tejados y mejorar la salud física y mental de las personas, logrando así disminuir los porcentajes de mortandad (cuadro 2).

Los beneficios ambientales, económicos y sociales que proveen los techos verdes (cuadro 2), permiten considerar a esta tecnología verde como una estrategia para contrarrestar los daños ocasionados al planeta y así contribuir al desarrollo sustentable.

A nivel ambiental los techos verdes contribuyen de forma positiva al cambio climático, ya que tienen la capacidad de contrarrestar el efecto de la isla de calor urbano disminuyendo la temperatura del ambiente entre 0.3 y 3°C [9]. También hacen posible la disminución de la concentración de polvo en la atmósfera en un 25% y almacenan un promedio de 168 g

de carbono por cada m<sup>2</sup> de su área [29], lo que permite disminuir la contaminación química existente. Asimismo, los techos verdes permiten reducir el consumo de agua dulce en las ciudades, pues disminuyen el flujo anual de escorrentía entre 27 y 81% a través de la retención del agua pluvial entre un 35 y 41% para poder ser reutilizada [24] y permiten estabilizar el nivel de aguas subterráneas y bajar así el riesgo por inundaciones en las urbes [30]. Finalmente, contribuyen a la conservación de la biodiversidad al funcionar como hábitat para la flora y fauna de las regiones, permitiendo así la reproducción y migración de las especies [28].

**Cuadro 2.** Beneficios de los Techos Verdes

SECTOR	BENEFICIOS
AMBIENTAL	Regulación térmica del ambiente Reducción del efecto de isla de calor urbano Mejora de la calidad del aire Secuestro de CO <sub>2</sub> Reducción de escorrentías Aprovechamiento del agua pluvial Aislamiento acústico Conservación de la biodiversidad
ECONÓMICO	Incentivos fiscales Incremento en el valor de los inmuebles Aumento en la vida útil de los tejados
SOCIAL	Reducción en el consumo de energía Mejora de la salud física y mental Disminución en los porcentajes de mortandad Fomento de las relaciones sociales Acceso a la educación verde Obtención de productos agrícolas para el autoconsumo Mejora estética de las urbes

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Berardi et al. [9]; El Economista [21]; Excelsior [22]; Green Roofs for Healthy Cities [23]; Grzegorz [24]; Keniger, Gaston, Irvine, & Fuller [25]; Markevych, et al. [26]; Meulen [27]; Wang, et al. [28].

Por otra parte, en la base social los techos verdes, principalmente de tipo intensivos, mejoran la salud física y mental de las personas por la captación de virus y contaminantes existentes en el ambiente, además de que permiten la activación física [26] y disminuyen los niveles de estrés y presión sanguínea de las personas [25] lo que hace posible el decremento de los porcentajes de mortandad hasta en un 9% [31]. Además, los techos verdes pueden dar acceso a las personas a alimentos agrícolas, pues es posible cultivar en ellos tomate, pepino, pimiento, albahaca, cebolla, lechuga, col, chícharo y frijol para el autoconsumo [32]. Asimismo, reducen el consumo de energía por el uso de aire acondicionado entre 25 y 80% gracias a que disminuyen la temperatura de las edificaciones hasta 20°C ya que absorben el 60% de la

radiación solar. Finalmente, proveen la oportunidad de aprender y conocer sobre biología y sus beneficios y hacen posible la mejora en las relaciones sociales, pues permiten la interacción social y disminuyen la violencia [25].

Finalmente, en lo que a beneficios económicos se refiere, en México la instalación de techos verdes hace posible obtener incentivos fiscales como lo es el descuento del 10% en el pago del predial [22]. Además de incrementar el valor de los inmuebles de aproximadamente 15% [33] y lograr extender la vida útil de los tejados a más de 60 años [30].

La gran cantidad de beneficios que aportan los techos verdes a la sociedad, al ambiente y a la economía resalta la importancia del estudio de esta tecnología verde principalmente en los ámbitos científico y tecnológico. De acuerdo con estadísticas de la base de datos científica Web of Science [34], 2017 fue el año con mayor producción científica, pues fueron publicados 933 productos científicos referentes a techos verdes. Además, cabe destacar que los Estados Unidos de América es el país con mayor producción científica, ya que en los últimos cinco años ha publicado 315 productos científicos. Es importante destacar que México no está dentro de los países con mayor producción científica respecto al tema, puesto que el número de publicaciones científicas del país, en los últimos cinco años, es de 10 productos científicos.

Por otra parte, existen organizaciones internacionales que se dedican al estudio, apoyo y fomento de la implementación de techos verdes. Un ejemplo de este tipo de organizaciones es World Green Infrastructure Network (WGIN), organización sin fines de lucro dedicada a investigar y difundir información acerca de los techos verdes, además de organizar y celebrar uno de los congresos más importantes a nivel mundial titulado “Congreso Mundial de Infraestructura Verde”, mismo que en 2010 se celebró en México [35]. Además, WGIN apoya a organizaciones nacionales de techos verdes como, en México, la Asociación Mexicana para la Naturación de Azoteas (AMENA) [36]. También existe Green Roofs for Healthy Cities, asociación americana sin fines de lucro que se encarga de impulsar la expansión y crecimiento de la industria de techos y paredes verdes en América del Norte [37].

Cabe destacar que también existen academias para formar profesionales especializados en techos verdes, siendo un ejemplo Living Architecture Academy de la asociación Green Roofs for Healthy Cities, donde se imparten cursos de capacitación y certificación en temas relacionados con su diseño, instalación y mantenimiento. Además, esta misma asociación cada año hace reconocimiento y premia, a través del programa Green Roof and Wall Awards of Excellence, al mejor diseño, la mejor investigación, la mejor contribución cívica y la contribución más significativa en la industria de los techos verdes [38].

### **Implementación de techos verdes en México**

Se considera que en la aplicación de esta tecnología verde México ha tenido un gran avance, pues actualmente cuenta con diferentes casos de éxito y se sigue trabajando en investigación e implementación y expansión de esta tecnología. México cuenta con casos de éxito de techos verdes como se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 3.** Techos Verdes en México

PROYECTO	UBICACIÓN	AÑO	ÁREA (m <sup>2</sup> )
<b>SECTOR PÚBLICO</b>			
Jardín Botánico CICEANA	Coyoacán, CDMX	1999	72
CENDI del Sistema de Transporte Colectivo	Cuauhtémoc, CDMX	2007	1190
Glorieta del metro	Insurgentes Cuauhtémoc, CDMX	2007	1037
Hospital de Especialidades Dr. Belisario Domínguez	Iztapalapa, CDMX	2008	975
Escuela Preparatoria Iztacalco “Felipe Carrillo Puerto”	Iztacalco, CDMX	2008	1500
Escuela Preparatoria Coyoacán “Ricardo Flores Magón”	Coyoacán, CDMX	2008	2225
Centro de Educación Ambiental “Yautlica”	Iztapalapa, CDMX	2008	1500
Secundaria Técnica N° 14 “Cinco de Mayo”	Benito Juárez, CDMX	2008	221
INFONAVIT	Álvaro Obregón, CDMX	2011	5266
Museo de Historia Natural	Miguel Hidalgo, CDMX	2015	72
<b>SECTOR PRIVADO</b>			
Tienda de Autoservicio Superama Polanco	Miguel Hidalgo, CDMX	2008	5014
Centro de Contacto Roberto González Barrera	Monterrey, Nuevo León	2013	1750
Universidad Iberoamericana CDMX	Álvaro Obregón, CDMX	2019	1350

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Calvo, et al. [39]; Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América [40]; Ecoosfera [41]; El Economista [42]; Excelsior [43]; Milenio [44]; Plan Verde [45]; Universidad Iberoamericana [46].

Como se observa en el cuadro 3, México cuenta con un número considerable de casos de éxito, sin embargo, para ejemplificar un caso de éxito se consideró el techo verde del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), por ser considerado el más grande e importante de Latinoamérica.

### Techo verde del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores

En 2008 nace la idea del proyecto de instalación de la azotea verde en el edificio de las oficinas del INFONAVIT, el cual tenía como principal objetivo fomentar la conciencia ecológica en la sociedad y mejorar el sistema de impermeabilización [47]. El proyecto comenzó a ejecutarse en marzo de 2011 y finalmente se inauguró el 7 de junio del mismo año por el expresidente Felipe Calderón y el director del instituto Víctor Manuel Borrás Setién [48].

El área total que alberga este techo verde es de 5266 m<sup>2</sup>, de la cual 2500 m<sup>2</sup> pertenecen al área verde del lugar. Dicha área verde está conformada por 163 especies diferentes de plantas nacionales [49]. El resto del área alberga espacios de descanso, ocio o deporte que incluyen una pista para correr de 400 m, un invernadero para la siembra y cosecha de hortalizas para el consumo de los empleados del propio instituto, un estanque de 1000 L de agua cristalina, baños y vestidores equipados con regaderas suministradas de agua caliente por calentadores solares [50], [51], [52].

La instalación de este techo verde tuvo un costo total de aproximadamente \$8,000,000.00 con bienes económicos [53]. A pesar de que el costo de instalación fue elevado, los beneficios ambientales, sociales y económicos que se han obtenido a largo plazo de este proyecto han sido bastantes y muy satisfactorios para los trabajadores de este.

Dentro de los beneficios ambientales está la posibilidad de cultivar hortalizas para el autoconsumo, reutilización de materiales orgánicos a través del uso de la lombricomposta, reutilización y ahorro del consumo de agua por medio del tratado, gestión y utilización de aguas pluviales para el riego del área verde, disminución de la temperatura del edificio del 10 al 15%, conservación de la flora nacional y la mitigación de la isla de calor urbana [43].

Por otro lado, dentro de los beneficios sociales destacan la posibilidad de utilizar el espacio con fines educativos, pues se dan recorridos escolares y permite el acceso a profesionistas de diferentes países para la realización de estudios e investigaciones [52]. También permite la recuperación de espacios con fines recreativos que hacen posible mejorar la salud física y psicológica de los trabajadores del lugar y del público en general [51].

Finalmente, de acuerdo con el diario Excelsior [43], los beneficios económicos que se han obtenido son principalmente el descuento en el pago del predial y agua de hasta un 30%, lo cual es muy significativo, pues se pagan alrededor de \$2,000,000.00 por concepto de predial. Asimismo, esta azotea verde ha permitido la reducción de consumo de energía por la disminución de utilización de aire acondicionado y calefacción, ya que disminuye la temperatura interior del edificio.

Por otra parte, es importante mencionar que esta azotea verde, además de ser considerada la más grande de Latinoamérica, ha obtenido importantes certificaciones como lo son la Certificación Roof Point por no hacer uso de químicos para su mantenimiento y contribuir al cuidado ambiental [52]. También obtuvo en 2011 la Certificación de Edificación Sustentable con grado de excelencia por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) [54].

El INFONAVIT es un instituto que busca estrategias para contribuir con el desarrollo sostenible en apego a los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible en la Agenda 2030, por lo que se considera un ejemplo para la adopción de ecotecnias que permitan lograr dichos objetivos y mejorar la calidad de vida de la sociedad. Por lo anterior, actualmente el INFONAVIT a través de su programa “hipoteca verde” creado en 2010, otorga un aumento en el crédito de viviendas para la instalación de ecotecnologías que permitan disminuir el consumo de agua, energía y gas [55].

Actualmente en México, en materia legal, se cuenta con la Norma Ambiental para el Distrito Federal publicada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), donde se establecen las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación.

## Conclusiones

Los techos verdes han funcionado como una estrategia para contribuir con el desarrollo sustentable, pues a través de esta tecnología verde es posible obtener beneficios ambientales como la disminución de la contaminación y temperatura del ambiente, beneficios sociales como la reducción de enfermedades y porcentajes de mortandad en la población y beneficios económicos como el ahorro por la disminución del consumo de energía. Sin embargo, a pesar de que esta tecnología aporta tales beneficios, es utilizada únicamente en ciertos países desarrollados como Suiza, Alemania, Francia y España y en algunos subdesarrollados como Colombia, Argentina y México, principalmente por el costo elevado de instalación y mantenimiento.

A pesar de que México es uno de los países que utiliza esta tecnología y de que alberga el techo verde más grande de Latinoamérica, a nivel de investigación científica el país se encuentra en una etapa temprana en producción de documentos científicos a nivel internacional, pues no figura dentro de los países con mayor producción. Lo que abre un abanico de posibilidades y oportunidades a futuras investigaciones respecto a los beneficios que es posible obtener con base en las condiciones ambientales, sociales y económicas del país.

## Referencias

- [1] Banco Mundial. (2017). Población urbana. [Online]. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/sp.urb.totl.in.zs>
- [2] Z. S. M. Odli, I. A. Zakarya, F. N. Mohd, T. N. T. Izhar, N. M. Ibrahim, y N. Mohamad. (2016). Green Roof Technology- Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effect. MATEC Web of Conferences, 78, 01100. [Online]. Recuperado de: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167801100>
- [3] Organización de las Naciones Unidas. (2017, Mayo 1). Objetivos de desarrollo sostenible. [Online]. Recuperado de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/05/hasta-13-millones-de-hectareas-de-bosques-desaparecen-cada-ano-por-la-accion-del-hombre/>
- [4] I. A. Rojas y E. Rodríguez. (n.d.). Cambio climático. [Online]. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/cambioclimatico.pdf>
- [5] M. Santamouris. "Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments", *Solar Energy*, vol. 103, pp. 682–703, Mayo 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- [6] R. D. Brown, J. Vanos, N. Kenny, y S. Lenzholzer. "Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change", *Landscape and Urban Planning*, vol. 138, pp. 118-131, Junio 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.006>
- [7] Y. Saharkhiz, M. Valizadeh. "Energy Consumption Reduction in Buildings Through Applying Green Roofs", *TOJDAC*, Edición Especial, pp. 1692–1696, Agosto 2016. <http://doi.org/10.7456/1060AGSE/051>
- [8] E. Oberndorfer, J. Lundholm, B. Bass, R.R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Köhler, K. K. T. Liu, B. Rowe. "Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services", *BioScience*, vol. 57, pp. 823–833, Noviembre 2007. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- [9] U. Berardi, A.H. Ghaffarianhoseini, A. Ghaffarianhoseini. "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs", *Applied Energy*, vol. 115, pp. 411–428, Febrero 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- [10] Green Roofs for Healthy Cities. (n.d.). About Green Roofs. [Online]. Recuperado de: <https://greenroofs.org/about-green-roofs/>
- [11] O. Pons, A. Nadal, E. Sanyé-Mengual, P. Llorach-Massana, E. Cuerva, D. Sanjuan-Delmàs, Pe. Muñoz, J. Oliver-Solà, C. Planas, M. R. Rovira. "Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism", *Procedia Engineering*, vol. 123, pp. 441–448, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.084>
- [12] J. A. Morales-Mojica, M. A. Cristancho-Santos, G. A. Baquero Rodríguez. "Tendencias en el diseño, construcción y operación de techos verdes para el mejoramiento de la calidad del agua lluvia. Estado del arte", *Ingeniería Del Agua*, vol. 21, pp. 179–196, Julio 2017. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6939>
- [13] Azoteas verdes. (n.d.). Costos de las azoteas verdes. [Online]. Recuperado de: <https://azoteasverdes.com.mx/cuantocuestaunaazoteaverde/>

- [14] B. A. Norton, A. M. Coutts, S. J. Livesley, R. J. Harris, A. M. Hunter, y N. S. G. Williams, "Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes", *Landscape and Urban Planning*, vol. 134, pp. 127–138, February 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- [15] O. Saadatian, K. Sopian, E. Salleh, C. H. Lim, S. Riffat, E. Saadatian, A. Toudeshki, M. Y. Sulaiman, "A review of energy aspects of green roofs", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 155–168, Julio 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>
- [16] Sempergreen. (n.d.). Diferencias entre cubiertas vegetales extensivas e intensivas. [Online]. Recuperado de: <https://www.sempergreen.com/co/soluciones/techo-verde/preguntas-frecuentes/que-es-una-cubierta-vegetal-extensiva>
- [17] Sempergreen. (n.d.). Mantenimiento de una cubierta vegetal. [Online]. Recuperado de: <https://www.sempergreen.com/co/soluciones/techo-verde/mantenimiento>
- [18] CMMAD, "Informe Brundtland – Nuestro futuro común", Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Asamblea General, Informe, 4 de agosto de 1987.
- [19] T. Kuhlman y J. Farrington, "What is Sustainability?", *Sustainability*, vol. 2, no.11, pp. 3436–3448, Noviembre 2010. <https://doi.org/10.3390/su2113436>
- [20] Organización de las Naciones Unidas. (2017, Junio 6). ¿Qué es el desarrollo sostenible y por qué es importante?. [Online]. Recuperado de: <http://www.onu.org.mx/que-es-el-desarrollo-sostenible-y-por-que-es-importante/>
- [21] I. Santa. (2010, Diciembre 9). Azoteas verdes, inversión de altura. [Online]. Recuperado de: <https://www.economista.com.mx/finanzaspersonales/Azoteas-verdes-inversion-de-altura-20101209-0054.html>
- [22] Excelsior. (2016, Enero 13). Ofrecen beneficios fiscales por instalar azoteas verdes en el DF. [Online]. Recuperado de: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/01/13/1068598>
- [23] Green Roofs for Healthy Cities. (n.d.). About Green Roofs. [Online]. Recuperado de: <https://greenroofs.org/about-green-roofs>
- [24] G. Peczkowski, T. Kowalczyk, K. Szawernoga, W. Orzepowski, R. Zmuda y R. Pokladek, "Hydrological Performance and Runoff Water Quality of Experimental Green Roofs", *Water*, vol. 10, no. 9, Septiembre 2018. <https://doi.org/10.3390/w10091185>
- [25] L. E. Keniger, K. J. Gaston, K. N. Irvine y R. A. Fuller, "What are the Benefits of Interacting with Nature?", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 10, no. 3, pp. 913-935, Marzo 2013. <https://doi.org/10.3390/ijerph10030913>
- [26] I. Markevych, J. Schoierer, T. Hartig, A. Chudnovsky, P. Hystad, A. M. Dzhambov, ..., M. Standl, J. Heinrich, E. Fuertes, "Exploring pathways linking greenspace to health : Theoretical and methodological guidance", *Environmental Research*, vol. 158, pp. 301–317, Octubre 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.028>
- [27] S. H. Van Der Meulen, "Costs and Benefits of Green Roof Types for Cities and Building Owners", *J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, vol. 7 no. 1, pp 57-71, 2019. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0225>
- [28] J. W. Wang, C. H. Poh, C. Y. Ting, V. N. Lee, A. Jain, E. L. Webb, "Building biodiversity: drivers of bird and butterfly diversity on tropical urban roof gardens", *ESA*, vol. 8, no. 9, Septiembre 2017. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1905>
- [29] P. M. Živković, D. G. Dimitrijević-Jovanović, Z. Z. Stevanović, "The impact of the building envelope with the green living systems on the built environment", *Thermal Science*, vol. 22, no. 4, pp. 1033–1045, 2018. <https://doi.org/10.2298/TSCI170531225D>
- [30] Sempergreen. (n.d.). Beneficios de una cubierta vegetal. [Online]. Recuperado de: <https://www.sempergreen.com/co/soluciones/techo-verde/beneficios>
- [31] W. L. Zijlema, A. Stasinska, D. Blake, M. Dirgawati, L. Flicker, B. B. Yeap, J. Golledge, G. J. Hankey, M. Nieuwenhuijsen, J. Heyworth, "The longitudinal association between natural outdoor environments and mortality in 9218 older men from Perth, Western Australia", *Environment International*, vol. 125, pp. 430–436, Octubre 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.075>
- [32] S. A. Walters, y K. S. Midden, "Sustainability of Urban Agriculture: Vegetable Production on Green Roofs", *Agriculture*, vol. 8, no. 11, Octubre 2018. <https://doi.org/10.3390/agriculture8110168>
- [33] Azoteas verdes. (n.d.). Beneficios de las azoteas verdes. [Online]. Recuperado de: <https://azoteasverdes.com.mx/beneficios/>
- [34] Web of Science. (n.d.). Análisis de los resultados. [Online]. Recuperado de: [https://wcs.webofknowledge.com/RA/analyze.do?product=UA&SID=5AlhsDwn7OjrtRXGY8&field=CU\\_CountryTerritory\\_CountryTerritory\\_en&yearSort=false](https://wcs.webofknowledge.com/RA/analyze.do?product=UA&SID=5AlhsDwn7OjrtRXGY8&field=CU_CountryTerritory_CountryTerritory_en&yearSort=false)
- [35] World Green Infrastructure Network. (n.d.). About us. [Online]. Recuperado de: <https://worldgreeninfrastructurenetwork.org/page.php?id=17&parent=8>

- [36] World Green Infrastructure Network. (n.d.). Amena Mexico. [Online]. Recuperado de: <https://worldgreeninfrastructurenetwork.org/sliderpage.php?id=98&page=458&paged=458&parent=8&encrypt=aa59d8402d6710862adad60876d9f0c0>
- [37] Green Roofs for Healthy Cities. (n.d.). About us. [Online]. Recuperado de: <https://greenroofs.org/about-1>
- [38] Green Roofs for Healthy Cities. (n.d.). 2017 Awards of excellence. [Online]. Recuperado de: <https://greenroofs.org/awards>
- [39] D. K. Calvo-Ramos, A. Gómez-De la Cruz, P. E. Rodríguez-Hernández, "Techos verdes: un estilo ecoamigable", *Digital Ciencia UAQRO*, 2016. [https://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v9-n1/QUIM-6.pdf](https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v9-n1/QUIM-6.pdf)
- [40] CICEANA, "Reporte anual 2013", Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, Reporte, 2013. Recuperado de: <http://www.ciceana.org.mx/assets/rep/2013.pdf>
- [41] Ecoosfera. (2014, Mayo 16). La azotea verde más grande de Latinoamérica crece en la Ciudad de México. [Online]. Recuperado de: <https://ecoosfera.com/2014/05/en-la-ciudad-de-mexico-crece-la-azotea-verde-mas-grande-de-latinoamerica/>
- [42] El economista. (2015, Enero 8). Techos verdes, por la ecología y la economía. [Online]. Recuperado de: <https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Techos-verdes-por-la-ecologia-y-la-economia-20150108-0203.html>
- [43] Excelsior. (2011, Junio de 7). Tiene el Infonavit la azotea verde más grande de América Latina. [Online]. Recuperado de: <https://www.excelsior.com.mx/2011/06/07/nacional/743131>
- [44] Milenio. (2015, Enero 27). Inauguran azotea verde en Museo de Historia Natural. [Online]. Recuperado de: <https://www.milenio.com/estados/inauguran-azotea-verde-museo-historia-natural>
- [45] Plan Verde. (2011). Azoteas verdes: una opción para la Ciudad de México. [Online]. Recuperado de: <http://www.planverde.cdmx.gob.mx>
- [46] Universidad Iberoamericana. (2019, Marzo 20). Universidad Iberoamericana CDMX inaugura azotea verde. [Online]. Recuperado de <https://ibero.mx/prensa/universidad-iberoamericana-cdmx-inaugura-azotea-verde>
- [47] T. M. Roofing. (2013). Techo verde del INFONAVIT-México, D.F. [Online]. Recuperado de: [https://mex.sika.com/dms/getdocument.get/6a1e572a.../techo\\_verde\\_infonavit.pdf](https://mex.sika.com/dms/getdocument.get/6a1e572a.../techo_verde_infonavit.pdf)
- [48] Expansión. (2011, Junio 7). Infonavit inaugura azotea verde gigante. [Online]. Recuperado de: <https://expansion.mx/obras/2011/06/07/infonavit-azotea-verde-sustentabilidad>
- [49] CICEANA, "Reporte anual 2017", Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, Ciudad de México, México, Reporte, 2017. Recuperado de: <http://www.ciceana.org.mx/assets/rep/2017.pdf>
- [50] Idea Jardín. *La azotea verde del INFONAVIT*. [Video]. 2015. De [https://www.youtube.com/watch?v=3\\_ga-qfgCOo](https://www.youtube.com/watch?v=3_ga-qfgCOo)
- [51] Proceso. *Las azoteas verdes vs el calor de la ciudad*. [Video]. 2018. De <https://www.youtube.com/watch?v=uB1pVIsMJkk>
- [52] El economista. (2015, Marzo 3). "La azotea verde más grande de AL". [Online]. Recuperado de: <https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/La-azotea-verde-mas-grande-de-AL-20150303-0147.html>
- [53] Grupo Reforma. *Construye INFONAVIT azotea verde más grande de Latinoamérica*. [Video]. 2011. De <https://www.youtube.com/watch?v=tV8EYri7o60>
- [54] Milenio. *La azotea verde más grande de América Latina está en México*. [Video]. 2018. De <https://www.youtube.com/watch?v=Bh4JFV1C2KE>
- [55] Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores. (2019, Febrero 1). "Hipoteca Verde". [Online]. Recuperado de: [https://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/trabajadores/cuido\\_mi\\_casa/hipoteca+verde](https://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/trabajadores/cuido_mi_casa/hipoteca+verde)

# Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica

## Secondary metabolites with medicinal activity extracted from fungi found in Central America

Luis Felipe Arce-Torres<sup>1</sup>, Isabella Gómez-Díaz<sup>2</sup>,  
Mariana Monge-Artavia<sup>3</sup>, Joselyn Prado-Cordero<sup>4</sup>

---

Arce-Torres, L; Gómez-Díaz, I; Monge-Artavia, M; Prado-Cordero, J. Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 80-89.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4416>

- 1 Colegio Científico Costarricense sede Cartago, Costa Rica.  
Correo electrónico: felipe14arce@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0003-3090-8530>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.  
Correo electrónico: isigd97@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0001-8300-0900>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.  
Correo electrónico: marige97@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0002-2798-7939>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.  
Correo electrónico: joselynprado97@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0001-9935-6450>



## Palabras clave

Penicilina; antibiótico; triterpenos; polisacáridos; anticancerígeno; antioxidante; psilocibina; psicoterapia.

## Resumen

Existe una gran diversidad de hongos que poseen actividad medicinal en Centroamérica y de ellos se pueden extraer los metabolitos secundarios responsables y adecuados para el tratamiento de distintas enfermedades. En esta revisión se realizó una investigación acerca de seis hongos específicos que se utilizan para el tratamiento de padecimientos físicos: *Penicillium chrysogenum* (*P. chrysogenum*), *Ganoderma lucidum* (*G. lucidum*), *Trametes versicolor* (*T. versicolor*), *Schizophyllum commune* (*S. commune*), *Pleurotus mutilus* (*P. mutilus*), *Lentinula edodes* (*L. edodes*), y un último hongo que tiene propiedades alucinógenas útiles en el tratamiento de enfermedades mentales: *Psilocybe cubensis* (*P. cubensis*). Se encontró que los metabolitos secundarios de mayor importancia para la industria médica son la penicilina y la tiamulina como antibióticos, los triterpenos por su actividad anticancerígena, diversos tipos de polisacáridos que tienen actividad antioxidante, antiparasitarios, estimulantes del sistema inmune y reguladores del colesterol. Asimismo, se estudió el alucinógeno psilocibina y su potencial en tratamientos de psicoterapia.

## Keywords

Penicillin; antibiotic; triterpenes; polysaccharides; anticarcinogenic; antioxidant; psilocybin; psychotherapy.

## Abstract

There's a wide diversity of fungi that have medicinal activity in Central America, from which the secondary metabolites responsible for that activity can be extracted in order to treat various diseases. In this review, six different fungi with the potential to treat physical disorders were studied: *Penicillium chrysogenum* (*P. chrysogenum*), *Ganoderma lucidum* (*G. lucidum*), *Trametes versicolor* (*T. versicolor*), *Schizophyllum commune* (*S. commune*), *Pleurotus mutilus* (*P. mutilus*), *Lentinula edodes* (*L. edodes*), and one hallucinogenic mushroom useful in the field of mental health issues: *P. cubensis*. The secondary metabolites of greatest importance were penicillin and tiamulin as antibiotics, triterpenes with anticarcinogenic activity, various polysaccharides with antioxidant and antiparasitic activity, immune boosting and cholesterol regulating properties. Additionally, the hallucinogen psilocybin and its potential in psychotherapy treatments was also studied.

## Introducción

Esta revisión bibliográfica corresponde al trabajo realizado para el curso electivo "Procesos Biotecnológicos con el Empleo de Hongos" de la carrera de Ing. en Biotecnología de la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica e impartido por el M.Sc. William Rivera.

A lo largo de los años el ser humano ha tratado de identificar a todos los seres vivos que habitan el planeta Tierra para poder diferenciarlos según su utilidad, perjuicio o solamente para conocer su entorno. Debido a esto, el ser humano ha ido evolucionando en conjunto con su entorno, desde la fabricación de las herramientas para la caza hasta la domesticación de especies de

flora comestibles. Desde tiempos remotos, los humanos han dependido, transformado y adecuado el entorno en donde se desarrollan para su bien, logrando alcanzar grandes beneficios [1].

Un grupo muy importante de organismos que han evolucionado con el pasar de los años junto con el hombre, es el de los hongos. Estos organismos son seres eucariotas pertenecientes al reino Fungi, algunas de sus características son que no poseen clorofila y pueden encontrarse en 4 niveles de organización (células libres, pseudomicelio, micelio y cuerpo fructífero). Además de esto, poseen dos tipos principales de morfología: unicelulares o filamentosos. A los hongos se les atribuyen múltiples aplicaciones entre las cuales destacan el aprovechamiento en la medicina y en la industria alimenticia [2]. Dentro de los más primitivos usos de los hongos se encuentra la producción de pan, cerveza y vino en civilizaciones tan antiguas como la Egipcia; en estas culturas, pese al desconocimiento a priori del porqué de los procesos, se realizaban fermentaciones para potabilizar el agua y poder tomarla [3].

Dentro de la diversidad fúngica, existen tanto hongos patógenos como beneficiosos para los seres humanos, de los beneficios principales de estos organismos se pueden destacar dos descubrimientos que fueron clave: Agostino Bassi en 1835 descubrió que la muscardina del gusano de seda era ocasionada por un hongo llamado *Beauveria bassiana* (hongo entomopatógeno) y Alexander Fleming en 1928 que encontró el efecto antibiótico de la penicilina [4].

Por su parte, dentro de los principales efectos perjudiciales de los hongos se puede mencionar que algunos causan padecimientos como reacciones de hipersensibilidad (alergias), micosis e infecciones (micotoxicosis y micetismos), además, existen hongos tóxicos o venenosos que pueden ocasionar severas lesiones y hasta la muerte al ser ingeridos [5]. Por otra parte, estos organismos son los principales productores de compuestos de uso médico como antibióticos, antioxidantes, anticancerígenos y otros. La producción a gran escala de estos compuestos es una parte muy fuerte de las industrias médica, farmacéutica y nutracéutica, en donde se aplican procesos biotecnológicos [6]. En la presente revisión bibliográfica se hablará de algunos hongos encontrados en Centroamérica que producen compuestos con actividad medicinal importante

### *Penicillium chrysogenum*

*Penicillium chrysogenum* (*P. chrysogenum*) es un hongo filamentoso perteneciente al filo Ascomycota y a la familia de los *Trichocomaceae*. Este microorganismo se encuentra en varios hábitats, donde crece principalmente en sustratos como pan y frutos cítricos en forma de colonias verde azuladas. Dentro de los ecosistemas que coloniza también se mencionan edificaciones con ambientes húmedos y mohosos, en las cuales sus esporas germinan y colonizan los ambientes en cuanto se dan las condiciones favorables para desarrollarse, producen el micelio del hongo y este es capaz de deteriorar diferentes materiales produciendo grandes daños a la infraestructura [7].

Aunado a esto, también puede ocasionar patologías severas en humanos como otomicosis, endoftalmítis y neumonías necrotizantes al colonizar vías respiratorias y otras mucosas [8]. La reproducción sexual de este hongo se basa en la producción de ascosporas contenidas en estructuras denominadas ascas. Por otra parte, la reproducción asexual (comúnmente utilizada para la conquista de diferentes hábitats) se da con la producción de conidios en estructuras especializadas llamadas conidióforos [9].

El género *Penicillium* es ampliamente utilizado en la industria alimenticia en distintos procesos; quesos cultivados como el Roquefort, Brie, Camembert, Stilton y otros, son producidos a partir de diferentes especies de *Penicillium* como *Penicillium roqueforti* en donde estos hongos proveen de una amplia gama de sabores y olores a los quesos por la interacción con sus conidios y micelio [10].

La producción industrial de compuestos medicinales es otra de las más fuertes aplicaciones de este género de hongos. Albert Fleming en los años 20's descubrió que *Penicillium notatum* producía una sustancia capaz de inhibir el crecimiento de otros organismos y la llamó penicilina. En la actualidad, este compuesto es un antibiótico perteneciente a la familia de los betalactámicos, capaz de contraatacar distintas infecciones bacterianas y que es producido industrialmente por este hongo para su empleo tanto en la industria médica como en la investigación. *P. chrysogenum* aparte de producir la penicilina es capaz de producir metabolitos secundarios como alcaloides, en específico roquefortina C, meleagrina y chrisogina [11].

### *Ganoderma lucidum*

Es un hongo perteneciente al filo Basidiomycota y a la familia *Ganodermataceae*. Su cuerpo fructífero generalmente crece en los troncos de angiospermas, posee un color rosado-arcilloso poco homogéneo con zonas de crecimiento concéntricas, al madurar adquiere un color blanco y sus basidiosporas presentan formas elipsoides o de pera [12].

*G. lucidum* ha sido una de las especies con mayor importancia medicinal gracias a sus efectos anticancerígeno, antimicrobiano, antiinflamatorio, antioxidante y antienvjecimiento [12]. Entre los compuestos activos que posee se encuentran polisacáridos, triterpenoides, fibra dietética, aminoácidos, péptidos, proteínas, alcoholes, fenoles, vitaminas y numerosos minerales. Todos ellos en conjunto le dan las propiedades como potencial tratamiento de diferentes enfermedades tales como hipertensión, úlceras gástricas, diabetes y hepatitis, y, el enfoque de esta parte de la revisión, el cáncer [13].

En algunas investigaciones se ha reportado que los componentes que poseen una mayor actividad fisiológica contra el cáncer son los polisacáridos y los triterpenos [14,15]. En general, los polisacáridos funcionan como antioxidantes y moduladores del sistema inmune, mientras que los triterpenos principalmente inhiben la proliferación de células cancerígenas [14]. Un triterpeno de importancia es el ácido ganodérico, que posee cuatro isoprenos cíclicos y dos lineales y se encuentra en abundancia en las esporas de *G. lucidum* [15].

De este ácido ganodérico, existen varios subtipos que generan citotoxicidad y pueden causar apoptosis en diferentes líneas celulares cancerígenas, entre ellos el ácido ganodérico T, ácido ganodérico D y ganoderiol F. Además, se ha encontrado que estas sustancias tienen la capacidad para regular el ciclo celular de las células cancerosas y reducir su potencial de realizar metástasis, impidiendo su proliferación hacia otras partes del cuerpo [15].

Esta inhibición a la metástasis se debe principalmente a que los triterpenoides tienen la capacidad de regular y disminuir la actividad de ciertos genes involucrados en su potencial migratorio en un 20%. Dichos genes corresponden a *HRAS*, *VIL2*, *S100A4*, *MCAM*, *I2PP2A* y *FN1*, muchos de ellos regulan la producción de proteínas de membrana que permiten la adhesión y el movimiento de las células cancerígenas a otros órganos [16].

Se ha encontrado una variedad de polisacáridos en el cuerpo fructífero, el micelio y las esporas de *G. lucidum*, que se piensa que los extraídos de distintas partes del hongo inducen a diferentes respuestas del sistema inmune [14]. Sus propiedades antitumorales pueden verse afectadas por el grado de ramificación del micelio, que a su vez influye en su solubilidad. En general, mejoran la respuesta del sistema inmune del cuerpo, ya que incrementa la actividad de los macrófagos y los linfocitos T e induce la secreción de compuestos como el TNF (Factor de Necrosis Tumoral). Tienen un efecto antioxidante en las células sanas y suprimen el proceso de angiogénesis, mediante el cual se forman nuevos vasos sanguíneos que nutren el tumor [15].

Asimismo, estudios han demostrado que estos compuestos pueden mediar la citotoxicidad de diferentes tipos de células tumorales, incluyendo las líneas celulares de cáncer de pulmón, de próstata y de seno. Además, tienen la capacidad de programar la muerte celular mediante una sobreexpresión del factor de crecimiento endotelial [17].

### *Trametes versicolor*

Es conocido como el hongo de la pudrición blanca, pertenece al filo Basidiomycota y a la familia *Polyporaceae*. Tiene un cuerpo fructífero en forma de abanico y una estructura en capas con zonas concéntricas de diferentes colores como el gris y el marrón. Comúnmente se encuentran en bosques secos y crecen sobre madera en descomposición [18], [19].

Este hongo presenta compuestos como el polisacárido PSK, un agente estimulador del sistema inmune, con propiedades anticancerígenas y actividad antioxidante. Además, se ha comprobado que los compuestos activos extraídos del micelio de *T. versicolor*, pueden ser utilizados para tratar individuos que hayan sido expuestos a una intoxicación hepática con  $\text{CCl}_4$ , debido a las propiedades antioxidantes y citoprotectoras de los metabolitos del hongo, los cuales reducen el estrés oxidativo provocado por los radicales libres del  $\text{CCl}_4$  y contribuyen a conservar el ambiente óxido-reducción del hígado [18].

Este hongo posee compuestos intracelulares como los intrapolisacáridos (IPS), que tienen la habilidad de inhibir el crecimiento de células tumorales, induciendo su apoptosis. Una manera de obtener una mejor producción de estos compuestos es utilizando tirosol. Se ha demostrado que este funciona como una molécula inductora de la síntesis de IPS en *T. versicolor* y además fortalece su actividad antitumoral. Esta técnica representa una nueva estrategia para producir polisacáridos fúngicos con actividad medicinal [20].

Al comparar la actividad antitumoral de este hongo con otros como *Ganoderma resinaceum* y *Phungia rufa*, se ha obtenido que *T. versicolor* presenta la mayor capacidad para reducir la proliferación de células tumorales. Esta actividad varía de un hongo a otro debido a las diferentes proporciones del contenido de azúcares y proteínas [21].

### *Schizophyllum commune*

Pertenece al género *Schizophyllum* es parte del filo Basidiomycota. Se ha reportado siendo hospedero de muchos organismos y se ha visto su crecer sobre madera en descomposición o en plantas [22]. *S. commune* ha sido reconocido por su importancia médica; desde la perspectiva farmacológica, es sumamente importante por la producción del polisacárido “schizophyllan” (SPG), al que se le atribuyen propiedades medicinales considerables [23, 24].

Mirfat [23] indica que algunos extractos de *S. commune* presentan propiedades curativas contra las infecciones por bacterias y hongos, por lo cual se pueden usar como posibles agentes antimicrobianos. Algunos de los microorganismos probados fueron bacterias patógenas comunes, es decir, *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli* y otras.

Durante las últimas cuatro décadas, extensos estudios sobre el “schizophyllan” han contribuido a la amplia aplicación del polisacárido biológicamente activo en productos farmacéuticos. Las bioactividades que presenta este compuesto incluyen actividades antineoplásicas, antibacterianas y propiedades antiparasitarias. También se han informado otros efectos fisiológicos, como los efectos hepatoprotectores y antiinflamatorios. Entre estas bioactividades, las más prometedoras son sus actividades antitumorales e inmunobiológicas [25].

Komatsu *et al.* [26] fueron los primeros en descubrir que una solución acuosa de SPG tiene una actividad antitumoral mediada por el huésped contra el Sarcoma 180. SPG fue eficaz contra distintos tumores alogénicos y singénicos en ratones, como carcinomas MM46 y MH-134, BC-47 tumor de vejiga, fibrosarcoma AMC-60 y carcinoma mamario A-755. Dicho compuesto en asociación con agentes quimioterapéuticos también inhibió la leucemia L1210, el melanoma B-16 y el fibrosarcoma Meth-A [25].

Mansour *et al.* [27] demostraron que el SPG, extraído de *S. commune*, redujo notablemente la incidencia de carcinomas mamarios y hepáticos, disminuyendo la proliferación celular en un modelo con ratones de carcinogénesis inducida por dimetil benz( $\alpha$ )antoceno (DMBA). Los autores concluyeron que por el nivel de seguridad del SPG y su costo relativamente bajo, además de su capacidad para inhibir carcinomas mamarios y para suprimir las lesiones hepáticas asociadas con el tratamiento con tamoxifeno, se puede continuar con investigaciones preclínicas, para la terapia de cáncer de mama con receptores de estrógenos positivos.

Es necesario estudiar y analizar más las capacidades que tiene *S. commune* y su principal compuesto de interés, el “schizophyllan” para comprobar la efectividad de este y aprovechar al máximo su potencial.

### ***Pleurotus mutilus***

Miembro del filum Basidiomycota y de la familia *Pleurotaceae*. *P. mutilus* es un hongo verdadero en forma de seta que presenta las mismas características generales que los demás basidiomicetes: pared celular mayoritariamente compuesta de quitina y glucano, hifas dicarióticas estériles y septadas, reproducción sexual mediante basidios con 4 basidiosporas (en promedio) y asexual mediante conidios, y con un tejido que cubre las láminas con las esporas hasta su maduración llamado himenio [28].

*P. mutilus* es el principal productor de un grupo de antibióticos conocidos como pleuromutilinas (descubiertos por primera vez en 1950), los cuales son los principales precursores de productos más específicos como lo son las tiamulinas y la valnemulina. Esta familia de antibióticos semisintéticos inhibe la síntesis proteica en ciertas bacterias mediante la unión del compuesto al componente bacteriano de la peptidil-transferasa de la subunidad 50S de los ribosomas; además, presentan baja citotoxicidad en mamíferos, poco impacto a especies no deseadas y un bajo impacto ambiental [29].

La tiamulina es un antibiótico bacteriostático a concentraciones terapéuticas, mostrando actividad a nivel ribosomal 70S donde se une principalmente a la subunidad 50S. Este antibiótico inhibe la producción de proteínas bacterianas mediante la producción de complejos de iniciación con inactivación bioquímica en donde no se permite la elongación del péptido. Por otra parte, este antibiótico ha mostrado actividad en el laboratorio contra bacterias como: *Brachyspira hyodysenteriae*, *Brachyspira pilosicoli*, *Lawsonia intracellularis* y *Mycoplasma spp* [30].

Como es común, además, se ha visto resistencia en especies de *Brachyspira* la cual se cree que es producto de mutaciones en los sitios de unión ribosomal o a una desensibilización a algunas otras pleuromutilinas. En general, la tiamulina presenta beneficios o usos en veterinaria, ya que se ha comprobado que tiene efectos en porcinos y conejos para el tratamiento y prevención de padecimientos como disentería porcina, ileitis, neumonía enzoótica y EEC (Enterocolitis Epizoótica del Conejo) [30].

Por otra parte, la biomasa producida en fermentación sólida de *P. mutilus* considerada como desecho luego de la producción y extracción de los antibióticos de interés, muestra propiedades de biorremediación al ser utilizada como bio-adsorbente de metales pesados y radioactivos

como lo es el uranio (presente en fuentes de contaminación acuífera), cobre y algunos iones ferrosos de cianuro. Esta aplicación es de gran interés a nivel global, ya que se tratan dos aristas ambientales de alto impacto como lo son: el uso y aprovechamiento de desechos industriales y la eliminación de compuestos o elementos contaminantes en el medio ambiente [31].

### *Lentinula edodes*

Es conocido como Shiitake, del filo Basidiomycota y de la familia *Tricholomataceae*. Su cuerpo fructífero tiene forma de seta de color café claro a oscuro y crece sobre madera en descomposición. Es originario de Asia, y producido en América Central y el Caribe [32]. Este hongo es reconocido por su valor nutricional, debido a su alto contenido de fibras y proteínas que contribuyen a la salud del ser humano, ya que previene enfermedades gastrointestinales, reduce el nivel de colesterol, mejora la presión sanguínea y participa en la prevención del cáncer. Además de esto, se han aislado otros metabolitos del Shiitake que presentan actividad antiinflamatoria, antitumoral, antiviral, y hepatoprotectora, convirtiendo a *L. edodes* en uno de los mejores alimentos funcionales [33].

Uno de los metabolitos más importantes del Shiitake es la eritadenina, la cual disminuye la concentración del colesterol en el cuerpo al modificar el procesamiento hepático de los lípidos. Estos efectos se han probado en ratones al proporcionarles una dieta suplementada con eritadenina, lo cual supone que los componentes de este hongo pueden ser utilizados para tratar hipercolesterolemia en seres humanos [33] [34].

El lentinan es un polisacárido aislado de *L. edodes* que se caracteriza por su actividad antitumoral debido a que posiblemente activa una respuesta inmune en el huésped, por lo cual ya se utiliza en el tratamiento de diferentes enfermedades cancerígenas; además, se ha investigado otras actividades biológicas del lentinan como la activación de respuestas inflamatorias no específicas [35].

Por otra parte, el contenido de polisacáridos, glucanos y fenoles de este hongo han sido estudiados encontrando propiedades antioxidantes debido a la estructura de anillos aromáticos de estos compuestos, protegiendo a las células de ser dañadas por los radicales libres que se producen por agentes externos [36]. Otros compuestos bioactivos extraídos del Shiitake son el alfa-tocoferol (vitamina E), el ácido oléico, el ergosterol y el ácido butírico; compuestos que en general pueden actuar como antioxidantes y poseen actividad anti-arteriosclerótica debido a su participación en el metabolismo lipídico [37].

### *Psilocybe cubensis*

Los hongos psicoactivos han sido utilizados por civilizaciones antiguas durante miles de años con fines religiosos, culturales y medicinales [38]. Uno de los más comunes en el continente americano es *P. cubensis* del filo Basidiomycota y de la familia *Strophariaceae*. Es pequeño, posee un tallo largo, delgado y fibroso, su sombrerillo es convexo y puede tener coloración azul oscuro conforme alcanza la madurez [39]. Si bien no es utilizado para tratar padecimientos físicos, se ha reportado su aplicación en la psicología clínica para tratar condiciones que afectan la salud mental gracias a sus efectos psicotrópicos.

El principal metabolito secundario que tiene actividad psicotrópica es la psilocibina (0-fosforil-4-hidroxi-N-dimetiltriptamina), un alcaloide que al ser ingerido es sometido a una desfosforilación y se transforma en psilocina (4-hidroxi-N dimetiltriptamina) [38]. Éste último posee un potencial alucinógeno mayor, ya que atraviesa las barreras entre los capilares y las neuronas del cerebro con mayor facilidad. Induce un estado de percepción alterado, sensación de euforia, alteración

de los colores, alucinaciones y despersonalización. Su intensidad varía de acuerdo con la especie que se utiliza, la cantidad ingerida, la sensibilidad al compuesto y demás factores [40]. Algunos de los efectos físicos que se pueden presentar son el aumento de las palpitations del corazón, hipertensión y temperatura corporal, sin embargo, no generan toxicidad. El mayor riesgo de ingerir psilocibina es la incapacidad para lidiar con la pérdida temporal de estabilidad psicológica [39].

La estructura molecular de la psilocina es muy similar a la de la serotonina (5-HT), y se ha encontrado que los efectos psicóticos resultan de su interacción con receptores 5-HT<sub>1A</sub>, 5-HT<sub>2A</sub> y 5-HT<sub>2C</sub> [41]. Su uso puede tener una influencia positiva durante sesiones de psicoterapia, lo cual ayuda a mejorar el humor y disminuir diferentes síntomas de enfermedades mentales, como el trastorno obsesivo compulsivo (TOC), depresión, ansiedad y adicciones [42].

Existen reportes de pacientes con TOC que después de ingerir *P. cubensis* presentan un alivio de sus síntomas durante varios meses, incluso si su experiencia estando bajo los efectos psicoactivos les generó ansiedad, y luego de un consumo frecuente lograron eliminar por completo sus pensamientos intrusivos [42]. Del mismo modo, su uso en el tratamiento de otros padecimientos psiquiátricos relacionados con desórdenes en los niveles de serotonina en el cerebro ha sido estudiado en algunos casos. Se ha tenido éxito eliminando síntomas ansiosos y depresivos en pacientes con enfermedades terminales, así como reduciendo el consumo de sustancias dañinas como el alcohol y drogas [43,44].

## Conclusiones

Los hongos ofrecen una gran variedad de metabolitos que pueden explotarse para aplicarlos a la medicina, siendo una de las mejores alternativas naturales para combatir enfermedades tanto comunes como aquellas que aún no tienen un tratamiento específico. En estos organismos se pueden encontrar compuestos como polisacáridos, triterpenos, antibióticos, proteínas y otros, cuyas funciones más importantes son la actividad anticancerígena o antitumoral, antiinflamatoria, antioxidante, antibiótica, algunos tienen un efecto hepatoprotector y otros pueden utilizarse como psicotrópicos para tratar enfermedades mentales.

A pesar de que el área centroamericana posea gran diversidad de especies fúngicas, su aplicación en la actividad medicinal no ha sido explotada como en otras partes del mundo; lo cual demuestra que aún existen muchas posibilidades de explotación científica para el beneficio de la humanidad.

## Agradecimientos

Se agradece al M.Sc. William Rivera Méndez, profesor e investigador de la Escuela de Biología y del Centro de Investigación en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su aporte, acotaciones, recomendaciones y apoyo con esta publicación.

## Referencias

- [1] M. Vásquez, "La relación del ser humano con su entorno. Dimensión Ética y Social", *Studiositas*, vol. 2, no. 1, pp. 55-60, 2017.
- [2] UACJ, "Introducción a los hongos" *Hoja Técnica de Divulgación Científica*, vol. 2, no. 1, pp.1-4, 2012.
- [3] E. Velasquez, "Asociación Micológica" *Fungipedia*, 15 Mayo 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.fungipedia.org/103-mi-blog/general/379-la-medicina-y-la-micologia-historia.html>. [Último acceso: 2018 Mayo 10]
- [4] N. Bernardo y J. Hermoso, "La casualidad que llevó al descubrimiento de la penicilina" *CISC*, Abr. 2015.
- [5] T. Urribarren, E. Bazán y L. Rosio, "Generalidad de la Micología" *Dpto. de Microbiología y Parasitología-Recursos de Micología*, vol. 3, no. 2, pp.3-9, 2017.
- [6] A. Ruiz, <Los hongos y su importancia>2014.[En línea]. Disponible en: [http://www.museocostarica.go.cr/es\\_cr/ent-rese-/los-hongos-y-su-importancia-3.html?Itemid=62](http://www.museocostarica.go.cr/es_cr/ent-rese-/los-hongos-y-su-importancia-3.html?Itemid=62)
- [7] D. Ellis, "Penicillium" The University of Adelaide, 15 Diciembre 2016. [En línea]. Disponible en: <https://mycology.adelaide.edu.au/descriptions/hyphomycetes/penicillium/>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [8] T.K. Plewaj y E. Lonc, "Molecular identification and biodiversity of potencial allergenic molds (Aspergillus and Penicillium) in the poultry house: first report" *Aerobiología*, vol.30, no. 4, pp.445-451, 2014.
- [9] F. Francis, K. Jaber, F. Colinet, D. Potetelle y E. Haubruge, "Purification of newfungal mannose-specific lectin from *Penicillium chrysogenum* and its aphidicial properties" *Fungi Biol*, vol. 115, no. 1, pp- 1093-1099, 2012.
- [10] V. Greenwood, "El fascinante mundo del interior del queso" *BBC Mundo*, 4 Diciembre 2014.
- [11] EcuRed, "Penicillium," 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Penicillium>
- [12] L.-W. Zhou, Y. Cao, S.-H. Wu, J. Vlasák, D.-W. Li, M.-J. Li, and Y.-C. Dai, "Global diversity of the *Ganoderma lucidum* complex (Ganodermataceae, Polyporales) inferred from morphology and multilocus phylogeny," *Phytochemistry*, vol. 114, pp. 7-15, Oct. 2014.
- [13] P. Batra, A. K. Sharma, and R. Khajuria, "Probing Lingzhi or Reishi Medicinal Mushroom *Ganoderma lucidum* (Higher Basidiomycetes): A Bitter Mushroom with Amazing Health benefits," *Int. J. of Medicinal Mushrooms*, vol.15, no. 2, pp. 127-142, 2013.
- [14] G.-S. Wu, J.-J. Guo, J.-L. Bao, X.-W. Li, X.-P. Chen, J.-J. Lu, and Y.-T. Wang, "Anti-cancer properties of triterpenoids isolated from *Ganoderma lucidum* - a review," *Expert Opin. Investig. Drugs*, vol. 22, no. 8, pp. 1-12, Aug. 2013
- [15] C.-H. J. Kao, A. C. Jesuthasan, K. S. Bishop, M. P. Glucina, and L. R. Ferguson, "Anti-cancer activities of *Ganoderma lucidum*: active ingredients and pathways," *Functional Foods in health and Disease*, vol. 3, no. 2, pp. 48-65, Feb. 2013.
- [16] J. Loganathan, J. Jilang, A. Smith, A. Jedinak, A. Thyagarajan-Sahu, G. E. Sandusky, H. Nakshatri, and D. Sliva, "The mushroom *Ganoderma lucidum* suppresses breast-to-lung cancer metastasis through the inhibition of pro.invasive genes," *Int. J. of Oncology*, vol. 44, no. 6, pp. 2009-2015, Apr. 2014.
- [17] L. Zengenni, G. Yu-Tong, Y. You-Jin, W. Ren-Cai, H. Qiu-Long, Y. X. Xing, "Ganoderma lucidum polysaccharides target a Fas/Caspase dependant pathway to induce apoptosis in human colon cancer cells," *Asian Pacific J. of Cancer Prevention*, vol. 15, no. 9, pp. 3981-3986, 2014
- [18] P. Rojas-Franco, E. Cano-Europa, R. Ortiz-Butron, R. Valenzuela-Garza, V. Blas-Valdivia, y M. Franco-Colin, "Efecto hepatoprotector del micelio de *Trametes versicolor* en un modelo de ratón de la cepa NIH," *Rev. Mex. Cienc Farm*, vol. 46, no. 1, pp. 56-63, 2015.
- [19] N. Ubau, "Distribución de Hongos Medicinales en las Macro Regiones Pacífico y Centro de Nicaragua 2006 - 2011," *Rev. Univ. Cienc.*, vol. 9, no. 15, pp. 4-16, 2016.
- [20] K. F. Wang, K. Sui, C. Guo, y C.Z. Liu, "Improved production and antitumor activity of intracellular protein-polysaccharide from *Trametes versicolor* by the quorum sensing molecule-tyrosol," *J. Funct. Foods*, vol. 37, pp. 90-96, 2017.
- [21] A. Silva, A. Miranda, E. Fernandes, S. Santos, I. Fraga, D. Santos y R. Bezerra, "Endopolysaccharides from *Ganoderma resinaceum*, *Phlebia rufa*, and *Trametes versicolor* Affect Differently the Proliferation Rate of HepG2 Cells," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 169, pp. 1919–1926, 2013.
- [22] S. Vázquez-Mendoza. "Nuevo hospedero del hongo *Schizophyllum commune* en América". *Rev. Mexicana de Biodiversidad*. vol. 84, no. 2, pp.661-663, 2013.
- [23] A. Mirfat, A. Noorlidah, S. Vikineswary, . "Antimicrobial activities of split gill mushroom *Schizophyllum commune*". *American Journal of Research Communication*, vol. 2, no. 7, pp. 113-124, 2014.
- [24] L. Castro, M. Álvarez & E. Martínez. "Case report of *Schizophyllum commune* sinusitis in an immunocompetent patient". *Rev Colombia Médica*. vol. 41, no. 1, pp.71-76, 2010.

- [25] Y. Zhang, H. Kong, Y. Fang, K. Nishinari, & G. Phillips. "Schizophyllan: A review on its structure, properties, bioactivities and recent developments". *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. vol.1, no.1, pp. 53-71, 2013.
- [26] N. Komatsu, S. Okubo, S. Kikumoto, K. Kimura, G. Saito, & S. Sakai. "Host-mediated antitumor action of schizophyllan, a glucan produced by *Schizophyllum commune*." *Gann*, pp. 137-144, 1969.
- [27] A. Mansour, A. Daba, N. Baddour, M. El-Saadani, E. Aleem. "Schizophyllan inhibits the development of mammary and hepatic carcinomas induced by 7,12 dimethylbenzo(a) anthracene and decreases cell proliferation: comparison with taxoxifen." *Rev. Cancer Research and Clinical Oncology*. vol. 138, no. 9, pp.1579-1596, 2012.
- [28] IMI, <International Mycotherapy Institute>, 15 Diciembre 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.imispain.com/los-beneficios-del-genero-pleurotus/>. [Último acceso: 2018 Mayo 10].
- [29] S. Sun, L. Ai, H. Zhang, C. Weng, C. Lai y L. Liu, «Enhanced production of pleurotulin by *Pleurotus mutilus* and study on its molecular structure» *Food Chemistry*, vol. 230, pp. 350-353, 2017.
- [30] A. Pinaluba, «Composición Cualitativa y Cuantitativa,» *Aditivos y Medicamentos para la sanidad y nutrición animal*, pp. 2-5, 2014.
- [31] M. Mezaguer, N. El Hayet Kamel, H. Lounici y Z. Kamel, «Characterization and properties of *Pleurotus mutilus* fungal biomass as adsorbent of the removal of Uranium (VI) from uranium leachate» *Journal Radioanalysis Nuclear Chemistry*, vol. 295, pp. 393-403, 2013.
- [32] M.A. Barradas, "Efecto de diferentes sustratos y cepas sobre las características físico-químicas y compuestos con actividad antioxidante en carpóforos de shiitake (*Lentinula edodes*)," Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Alimentarias, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México, Octubre, 2015.
- [33] O.M. Rivera, W. Albarracín y M. Lares, "Componentes Bioactivos del Shiitake (*Lentinula edodes* Berk. Pegler) y su impacto en la salud," *AVFT*, vol. 36, no. 3, pp. 67-71, 2017.
- [34] H. Yang, I. Hwang, S. Kim, E.J. Hong y E.B. Jeung, "*Lentinus edodes* promotes fat removal in hypercholesterolemic mice," *Exp Ther Med*, vol. 6, no. 6, pp. 1409-1413, Dic, 2013.
- [35] T.C. Finimundy, G. Gambato, R. Fontana, M. Camassola, M. Salvador, S. Moura, J. Hess, J.A.P. Henriques, A.J.P. Dillon y M. Roesch-Ely, "Aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus sajor-caju* exhibit high antioxidant capability and promising in vitro antitumor activity," *Nutr Res*, vol. 33, pp. 76-84, 2013.
- [36] M. Kozarski, A. Klaus, M. Niksic, M.M. Vrvic, N. Todorovic, D. Jakovljevic, y L.J.L.D. Van Griensven, "Antioxidative activities and chemical characterization of polysaccharide extracts from the widely used mushrooms *Ganoderma applanatum*, *Ganoderma lucidum*, *Lentinus edodes* and *Trametes versicolor*," *J Food Compost Anal*, vol. 26, pp. 144-153, 2012
- [37] M.A. Rahman, N. Abdullah, N. Aminudin, "*Lentinula edodes* (shiitake mushroom): An assessment of in vitro anti-atherosclerotic bio-functionality," *Saudi J Biol Sci*, 2016.
- [38] F. J. Carod-Artal, "Alucinógenos en las culturas precolombinas mesoamericanas," *Neurología*, vol. 30, no. 1, pp. 42-49, Feb. 2015.
- [39] G. P. Menser, *Hallucinogenic and Poisonous Mushroom Field Guide*. California, USA: Ronin Publishing.
- [40] G. Burillo-Putze, E. López-Briz, B. Climent-Díaz, P. Munné-Mas, S. Nogue-Xarau, M.A. Pinillos, R.S. Hoffman, "Drogas emergentes (III): plantas y hongos alucinógenos," *Anales. Sis. San. Navarra*, vol. 36, no. 3, Dic. 2013.
- [41] K. Stebelska, "Fungal Hallucinogens Psilocin, Ibotenic Acid, and Muscimol: Analytical Methods and Biological Activities," *Ther. Drug Monit.*, vol. 35, no. 4, pp. 420-442, Aug. 2013.
- [42] J. A. Wilcox, "Psilocybin and Obsessive-Compulsive Disorder," *J. of Psychoactive Drugs*, vol. 46, no. 5, pp. 393-395, Nov. 2014.
- [43] A. K. Loizaga-Velder y A. Loizaga-Pazzi, "El potencial terapéutico de los alucinógenos en el tratamiento de las adicciones," *Rev. Electrónica de Psicología Iztacala*, vol. 20, no. 3, pp. 924-953, Sep. 2017.
- [44] F. Tylš, T. Páleníček y J. Horáček, "Psilocybin-summary of knowledge and new perspectives," *European Neuropsychopharmacology*, vol. 24, no. 3, pp. 342-356, Mar. 2014.

# Construcción de una mesa de succión de doble capa de bajo costo para definir macroporosidad (porosidad drenable) y microporosidad

## Construction of a low-cost suction table to define macroporosity (drainable porosity) and microporosity

Adrián Enrique Chavarría-Vidal<sup>1</sup>, Jarbas Honorio de Miranda<sup>2</sup>,  
Asdrubal Farias-Ramírez<sup>3</sup>

Chavarría-Vidal, A; Honorio de Miranda, J; Farias-Ramírez, A. Construcción de una mesa de succión de doble capa de bajo costo para definir macroporosidad (porosidad drenable) y microporosidad. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 90-97.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4466>

1 Profesor Escuela Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Estudiante doctorado Ciencias Naturales para el Desarrollo. Costa Rica. Correo electrónico: adchavarría@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

2 Profesor Engenharia em Biossistemas, Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo. Brasil.

 <https://orcid.org/0000-0001-9866-008X>

3 Estudante de doutorado, Engenharia em Biossistemas, Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo. Brasil.

 <https://orcid.org/0000-0003-1544-8759>



## Palabras clave

Macro porosidad; micro porosidad; porcentaje humedad gravimétrica; porcentaje de humedad volumétrica.

## Resumen

La necesidad de conocer la porosidad drenable del suelo o macroporosidad con fines de manejar correctamente el agua en el suelo, sea ésta con fines de riego o con fines de drenaje ha tomado cada vez mayor relevancia. Para ello existen equipos que se ofrecen en casas comerciales generalmente de costos altos. No obstante, conociendo la física del agua en una matriz arenosa se puede construir una mesa de succión (mesa de tensión) con arena llamada comúnmente caja de arena para estimar la macro y microporosidad y como tal la porosidad total presente en un suelo.

Las micro porosidades obtenidas para un suelo arenoso expresado en contenido de humedad volumétrica sometido a una succión de 60 cmca (centímetros de columna de agua) y a 100 cmca fueron 11,12% y 5,73% respectivamente y las macro porosidades obtenidas y expresadas en términos de porcentaje de humedad volumétrica para un suelo arenoso sometido a una succión de 60 cmca y a 100 cmca fueron 25,14% y 30,53%.

## Keywords

Macro porosity; micro porosity; gravimetric humidity percentage; volume humidity percentage.

## Abstract

The need to know the drainable porosity of the soil or macro porosity in order to correctly manage the water in the soil, whether it is for irrigation purposes or for drainage purposes, has taken on increasing relevance. For this there are equipment that is offered in commercial houses, usually with high costs. However, knowing the physics of water in a sandy matrix, you can build a suction table (tension table) with sand commonly called sandbox to estimate the macro and micro porosity and as such the total porosity present in a soil.

The micro porosity obtained for a sandy soil subjected to a suction of 60 cmca (centimeters of water column) and 100 cmca were 11,12% and 5,73% of gravimetric humidity and the macro porosity obtained and expressed in terms of percentage of gravimetric humidity  $((g_{\text{water}}/g_{\text{soil}}) * 100)$  for a sandy soil subjected to a suction of 60 cmca and 100 cmca were 25,14% and 30,53%.

## Introducción

La capacidad de un suelo para almacenar y transmitir agua son propiedades que inciden en su calidad y el sistema poroso es el responsable de ambas acciones [1].

A la razón del volumen total de vacíos (Vv) que se presenta en un suelo y el volumen total de dicho suelo (VT) se define con el nombre de porosidad total del suelo (P) [2]. Por ello a la porosidad total del suelo se le llama índice de volumen relativo de poros en el suelo con relación al volumen total [3].

$$\%P = \frac{Vv}{VT} * 100 \dots\dots\dots 1$$

Además, la porosidad total del suelo puede calcularse, a partir de la densidad real ( $D_r$ ) o peso específico del suelo y densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) o peso específico aparente del suelo por medio de la siguiente relación [4]:

$$\%P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) * 100 \dots\dots\dots 2$$

La porosidad se ha subdividido en varios tipos y para ello existen varias clasificaciones como lo son la porosidad según sus diferentes tamaños, según su funcionalidad con respecto al comportamiento hidráulico y los tamaños de diversos organismos vivos y las raíces. Para el caso del tipo de poros según su comportamiento hidráulico se clasifican en poros comunicantes (poros que funcionan de almacenamiento y drenaje) y no comunicantes (poros residuales) donde, los primeros se encuentran entre una succión de 0 - 1500 kPa (kilo pascales) de tensión de agua en el suelo y los segundos son todos los poros que se encuentran a una succión menor a 1500 kPa. Los poros comunicantes a su vez, se clasifican en poros de drenaje que son todos aquellos poros que se presentan entre una succión de 0 – 10 kPa, los poros de almacenamiento que se presentan entre una succión de 10 kPa – 1500 kPa y los poros residuales que se presentan a una succión > 1500 kPa [1]. Además, el mismo autor menciona que Capacidad de Campo se presenta a una succión de 10 kPa (100 cmca) y el Punto de Marchitez Permanente se presenta a una succión de 1500 kPa (15000 cmca).

Según la clasificación por tamaño de los poros se clasifican en macroporos que son todos los poros mayores a 0,08 mm y los microporos que son todos aquellos poros menores a 0,08 mm. Los macroporos generalmente se encuentran entre las unidades estructurales de drenaje del agua gravitacional y que transmiten el aire de manera eficiente. Los microporos por el contrario, el movimiento relativo de aire y de agua es muy lento, y se subdividen en mesoporos (0,03 – 0,08 mm) que son aquellos poros que quedan llenos de agua después de drenar libremente pero que tienen un movimiento de agua capilar y es disponible para las plantas, microporos (0,005 – 0,03 mm) que son aquellos que se encuentran dentro de las unidades estructurales del suelo y retienen agua disponible para las plantas, ultramicroporos (0,0001 – 0,005 mm) que retienen agua no disponible para las plantas y los criptoporos que son aquellos < 0,0001 mm [5].

De lo anterior podemos afirmar que:

$$\text{Porosidad total} = \text{microporosidad} + \text{macroporosidad} \dots\dots\dots 3$$

$$\text{Macroporosidad} = \text{Porosidad total} - \text{Microporosidad} \dots\dots\dots 4$$

La microporosidad puede ser definida como el volumen de poros del suelo que posee un diámetro menor que 0,050 mm (50  $\mu$ m), lo cual corresponde al agua remanente después de ser el suelo drenado de los macroporos cuando se logra un equilibrio de una columna de agua de 0,60 m. Por ello la microporosidad corresponde al volumen de agua que ocupa un suelo después de alcanzar el equilibrio cuando es sometido a un potencial de 0,60 m que [6]. Además, el mismo autor define los diferentes tamaños de poros de la siguiente manera: los macroporos son todos los poros con un diámetro equivalente > 300  $\mu$ m y una columna de succión de agua  $\leq$  0,1 mca, mesoporos son todos los poros con un diámetro equivalente 300 - 50  $\mu$ m y una columna de succión de agua 0,1 – 0,6 mca, los microporos son todos los poros con un diámetro equivalente 50 – 0,2  $\mu$ m y una columna de succión de agua 0,6 - 150 mca y los criptoporos son todos los poros con un diámetro equivalente <0,20  $\mu$ m y una columna de succión de agua > 150 mca.

Se puede observar que existe una relación entre el diámetro del poro equivalente y la succión de agua en el suelo cuyo nombre es la ecuación de capilaridad, la cual; [6] la define de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{0,3}{h} \dots\dots\dots 5$$

Donde:

$\phi$  : diámetro equivalente del poro (cm)

h: altura de columna de agua (cm)

Un concepto asociado a la macroporosidad es el de porosidad drenable (Pd). Esta última se define como el volumen de agua que es drenado libremente por unidad de volumen total del suelo ( $\text{cm}^3_{\text{agua}} / \text{cm}^3_{\text{suelo}}$ )\*100. De esta forma será [7]:

$$Pd = \frac{\text{Volumen de agua drenada libremente}}{\text{Volumen total de suelo}} \dots\dots\dots 6$$

Claro está, después de que un suelo drene libremente el entra en el índice de humedad de capacidad de campo (máximo contenido de humedad que retiene el suelo en contra de la fuerza de la gravedad) y por ello la porosidad drenable o macroporosidad (anterior ecuación) queda de la siguiente manera [8] [7]:

$$Pd = \theta_{sat} - \theta_{cc} \dots\dots\dots 7$$

Por lo que:

$$\text{Macroporosidad} = \text{Porosidad drenable} \dots\dots\dots 8$$

Donde:

$\theta_{sat}$  = humedad a saturación del suelo (todos los macroporos y microporos llenos de agua)

$\theta_{cc}$  = humedad a capacidad de campo (todos los microporos llenos de agua)

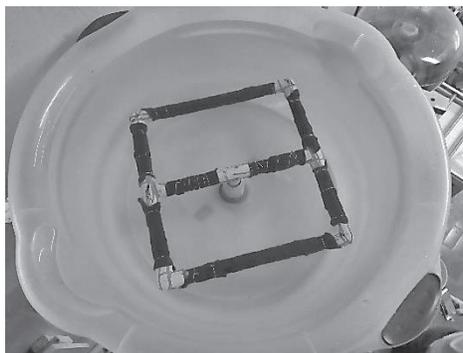
Valores encontrados en la literatura de capacidad de campo y punto de marchitez permanente ( $\theta_{pmp}$ ) en suelos arenosos son  $\theta_{cc} = 5\% - 7\%$  y  $\theta_{pmp} = 1\% - 3\%$  [9],  $\theta_{cc} = 9\%$  y  $\theta_{pmp} = 2\%$  [10],  $\theta_{cc} = 9\%$  y  $\theta_{pmp} = 2\%$  [11]

## Metodología

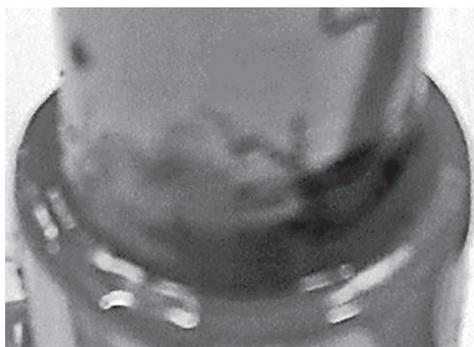
Se adquirieron los materiales que fueron un tubo de 12 mm de diámetro de PVC, 4 codos de PVC de 12 mm, 3 T de 12 mm de PVC, pegamento para PVC, tela de porosidad fina, fajas plásticas, 1 flanyer, conexiones de la tubería de PVC al flanyer y una cuba de plástico grueso y pegamento araldite professional.

El tubo de PVC se cortó en pequeños trozos para formar dos rectángulos que unidos forman un cuadrado como se muestra en la figura 1, de tal manera que pueda entrar dentro de la cuba. Las uniones fueron selladas totalmente con pegamento para PVC para evitar la entrada de aire como se muestra en la figura 2. En estos rectángulos se perforaron los tubos a lo largo cada 10,0 mm en cruz, con un diámetro constante de 1,0 mm. Los tubos perforados se envolvieron en una tela porosa de poros muy pequeños y fueron sujetas con gazas plásticas. Luego a la cuba se le hizo una perforación en el fondo y centro de la misma con un diámetro ligeramente mayor para instalar el flanger el cual se instaló y en el proceso de selló para evitar la entrada de aire

al sistema con el pegamento araldite profesional. Luego se realizó la conexión del flanger con la tubería de PVC la cual queda dentro de la cuba y también, se le instaló en el lado de abajo de la cuba, el sistema de drenaje que va a dar la columna de agua según la altura de succión que se les aplicará a las muestras. El costo de materiales de construcción y mano de obra fue de \$110.00 lo cual representa una fracción del costo de las que se ofrecen en el mercado.



**Figura 1.** tubería distribuidora de la presión de succión.



**Figura 2.** Sellado total de las uniones de PVC

Después de la construcción se procedió a saturar y depurar el sistema para sacar todo el aire que pudiera existir en el mismo ya que, las burbujas de aire tienen la capacidad de romper la tensión que ejerce la columna de agua

Como se muestra en la figura 3, se marcó la altura de succión cada 10 cm la cual es la referencia para controlar la tensión a aplicar a las muestras de suelo considerando que el nivel cero de succión se establece al mismo nivel de la altura máxima que queda la arena en la mesa de succión de bajo costo como se muestra en la figura 4.

Para lograr que la mesa de succión pueda ejercer una mayor succión de como mínimo 120 cm de columna de agua y cumplir con 60 o 100 cmca según el sistema de clasificación de macroporosidad usado, se utilizó doble capa de arena como se muestra en la figura 4. La primera capa de arena colocada en el fondo de la cuba fue un tamaño promedio de arena de 0,5 – 0,25 mm considerada como arena media y la segunda capa colocada la cual quedó en la superficie de la mesa de succión fue de 0,25 a 0,10 mm considerada como arena fina. La capa de arena media cubrió hasta con 5 cm de altura arriba de la tubería de PVC transportadora de la tensión ejercida como mínimo y la capa de arena fina fue de 5 cm como mínimo de grosor.



**Figura 3.** Diferentes niveles de tensión a aplicar expresado en centímetros de altura de columna de agua



**Figura 4.** Colocación de los dos tamaños de arena para formar una doble capa de succión.



**Figura 5.** Colocación de las muestras en la mesa de succión para saturación y posterior proceso de aplicación de diferentes succiones

## Resultado y sus análisis

El promedio de las 3 repeticiones para cada una de las succiones con respecto a la humedad del suelo expresado en los porcentajes de humedad gravimétrica y humedad volumétrica se muestra en el cuadro 1

**Cuadro 1.** Porcentaje de humedad gravimétrica y volumétrica promedio presente en las muestras de suelo arenoso según la succión ejercida por la columna de agua.

Tensión	%HG Promedio	%HV Promedio
0,0001	22,52	36,26
10	21,45	34,53
20	20,57	33,12
30	19,01	30,61
40	15,90	25,60
50	12,05	19,40
60	6,91	11,12
70	5,52	8,88
80	4,48	7,21
90	3,92	6,32
100	3,56	5,73
110	2,45	3,95
120	1,86	2,99
Dap=	1,61	g/cm <sup>3</sup>

Se observa en el cuadro 1 que la microporosidad o la máxima capacidad de retención total de humedad en el suelo en contra de la fuerza de la gravedad que se define como la cantidad de agua que queda en el suelo cuando este ha sido sometido a una succión de 60 cmca expresadas en términos de porcentaje de humedad gravimétrica  $((g_{\text{agua}}/g_{\text{suelo}}) * 100)$  y porcentaje de humedad volumétrica  $(\text{cm}^3_{\text{agua}} / \text{cm}^3_{\text{suelo}}) * 100$  son de 6,91% y 11,12% respectivamente. La microporosidad cuando el suelo ha sido sometido a una succión de 100 cmca expresadas en términos de porcentaje de humedad gravimétrica y porcentaje de humedad volumétrica son de 3,56% y 5,73% respectivamente. La macroporosidad o porosidad drenable expresada en términos de porcentaje de humedad gravimétrica y volumétrica cuando el suelo ha sido sometido a una succión de 60 cmca es de 15,61% y 25,14% respectivamente y la macroporosidad cuando el suelo ha sido sometido a una succión de 100 cmca expresadas en términos de porcentaje de humedad gravimétrica y volumétrica es de 18,96% y 30,53% respectivamente.

## Recomendaciones

Para obtener mayor capacidad de succión de 120 cmca en la mesa de succión se debe de usar arena muy fina en la capa superior en el caso de tener escases de la misma, sino en su defecto; utilizar en toda la mesa de succión arena muy fina.

Las burbujas de aire deben ser en la medida de lo posible, eliminadas por completo del sistema de tuberías debido a que éstas rompen la columna de succión de agua que se ejerce sobre las muestras.

## Conclusiones

La mesa de succión o mesa de tensión de bajo costo es una buena herramienta para determinar la macroporosidad del suelo llamada también porosidad drenable total del suelo según los valores teóricamente definidos. Además, es una herramienta para determinar microporosidad del suelo o capacidad de campo expresado en succiones de 60 cmca o de 100 cmca.

No obstante, en suelos que presentan mucha macroporosidad como es el caso de los suelos arenosos y areno francosos, la mesa de succión funciona para determinar la curva característica de desabsorción de agua en el suelo donde se puede obtener porcentajes de humedades gravimétricas y volumétricas bajos en el suelo como el caso de 1,86% de humedad gravimétrica correspondiente a 2,99% de humedad volumétrica encontradas las cuales corresponden a porcentajes de humedad del punto de marchitez permanente según la literatura.

Ante lo anterior, este equipo presenta un costo bajo respecto al ofrecimiento de casas comerciales.

## Referencias

- [1] J. Porta, M. A. López and R. Poch, *Edafología: Uso y protección de suelos*, Cataluña: Mundi-Prensa, 2014, p. 608.
- [2] M. Rijo, 2017.
- [3] M. Calvache, *Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Agropecuarias.*, 2002.
- [4] A. L. Jordan, *Manual de Edafología*, Sevilla, 2016, p. 143.
- [5] N. C. Brady and R. R. Weil, *Elementos da natureza e propiedades dos solos*, 3ra. ed., Porto Alegre: Bookman, 2013, p. 686.
- [6] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), *Manual de métodos de análise de solo*, 3ra. rev. e ampl. ed., Brasília, D.F. Brasília, 2017, p. 573.
- [7] S. Nascimento Duarte, J. Honorio de Miranda, É. Farias de França e Silva, J. Francismar de Medeiros, R. Tabora Costa and H. Raj Greyi, *Fundamentos de drenagem agrícola*, 1ra ed., Fortaleza, 2015, p. 356.
- [8] C. Rogério de Mello, G. César de Oliveira, D. Furtado Ferreira and J. María de Lima, "Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG.," *Pesquisa Agropecuaria*, vol. 37, no. 9, pp. 1319 - 1324, 9 2002.
- [9] P. Silva C., H. Silva R., M. Garrido S. and E. Acevedo H., Santiago, 2015, p. 86.
- [10] Unidad de hidrología, Dpto de Suelos y aguas, Facultad de Agronomía - Universidad de la república, Montevideo, Sf., p. 45.
- [11] Traxco, *Componentes para sistemas de riego Pivot*, 2009.

# Desarrollo de un enjuague bucal natural a partir de extractos de zingiberáceas orgánicas disponibles en Costa Rica

## Development of a natural mouthwash from organic Zingiberaceas extracts available in Costa Rica

Bernardo Soto-Calvo<sup>1</sup>, Edurne Mendaza-Lainez<sup>2</sup>, Irene Varela-Rojas<sup>3</sup>

---

Soto-Calvo, B; Mendaza-Lainez, E; Varela-Rojas, I. Desarrollo de un enjuague bucal natural a partir de extractos de zingiberáceas orgánicas disponibles en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 98-104.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4468>

1 Tecnólogo de Alimentos, empresa Bioextractos S.A., Costa Rica.

Correo electrónico: bernardo.soto@bioextractos.com

2 Pasante internacional con grado en Innovación en Procesos y Productos Alimentarios. España. Correo electrónico: edurne.mendaza@gmail.com

3 Tecnóloga de Alimentos, Investigadora Catedrática de la Escuela de Química, Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ivarela@tec.ac.cr.



## Palabras clave

Enjuague bucal natural; gingivitis; placa bacteriana; odontología; salud bucal; cúrcuma; jengibre.

## Resumen

Este artículo presenta un innovador enjuague bucal totalmente natural formulado con aceites esenciales de *Curcuma longa*-Linn y *Zingiber officinale*-Roscoe (variedad hawaiana). Los resultados de los ensayos de formulación se evaluaron con una prueba sensorial usando una escala hedónica para elegir entre dos alternativas: enjuague neutro o pungente. Las biomoléculas presentes en la mezcla se consideran en investigaciones anteriores como nutraceuticas, incluyen propiedades antiinflamatorias y antisépticas validadas en aplicaciones orales, el producto mejora la higiene bucal y funciona bien para los dientes y las encías. El mercado global ha puesto de moda este tipo de productos y, además, la formulación tiene un alto potencial en cuanto a salud oral preventiva.

## Keywords

Natural mouthwash; gingivitis; bacterial plaque; dentistry; oral health; turmeric; ginger.

## Abstract

This article presents an innovative totally natural mouth wash formulated with essential oils of *Curcuma longa*-Linn and *Zingiber officinale*-Roscoe (Hawaiian variety). The formulation essay output was evaluated with a sensorial test using a hedonic scale to choose between two alternatives: a plain or pungent base. Biomolecules present in the blend are considered in previous investigations as a nutraceutical, include anti-inflammatory and antiseptic properties validated in oral applications, the product improves the oral hygiene and works well for teeth and gums. The global market puts on a trend this kind of product, it has high potential considering the oral preventive health capability.

## Introducción

Las hierbas y plantas medicinales se han utilizado para el tratamiento de varias enfermedades desde la antigüedad [1, 2] y hay evidencia de que su uso sigue en aumento [2]. Se ha estimado que el 80% de la población de países en desarrollo (principalmente Pakistán, India y Bangladesh) dependen principalmente de la medicina tradicional para satisfacer sus necesidades de cuidado de la salud [1, 2]. El uso frecuente de los agentes terapéuticos actuales ha propiciado el desarrollo de cepas resistentes de patógenos e incrementado la incidencia de efectos adversos asociados a su uso [1]. En cuanto a la salud bucodental fundamental para gozar de una buena salud y una buena calidad de vida, se puede definir como la ausencia de dolor facial, cáncer de boca o de garganta, infecciones y llagas bucales, enfermedades periodontales (de las encías), caries, pérdida de dientes y otros trastornos que limitan la capacidad de morder, masticar, sonreír y hablar, al tiempo que repercuten en el bienestar psicosocial [3]. Abunda la documentación sobre cúrcuma y jengibre referida al cuidado odontológico, su fácil disponibilidad local y global convierten a estos rizomas en candidatos viables para el desarrollo de varios remedios orales [4].

Las propiedades medicinales de la cúrcuma se atribuyen a la bioactividad de los componentes producidos en las rutas del metabolismo secundario: compuestos fenólicos y aceites volátiles [5]. Entre estos compuestos está la curcumina y otras moléculas como tumerona, atlantona y zingibereno. La curcumina se ha utilizado extensamente en la medicina tradicional durante siglos, ya que tiene una variedad de propiedades terapéuticas siendo un componente inocuo, antioxidante, analgésico, antiinflamatorio, antiséptico y preventivo del cáncer [1]. La cúrcuma juega un papel importante en la odontología ya que resulta útil en el tratamiento de diferentes enfermedades bucales como dolor dental, enfermedades periodontales y cáncer oral entre otros [4], así como agente antimicrobiano y antifúngico [6]. Las enfermedades gingivales y periodontales afectan a la mayoría de la población a nivel mundial [3, 7]. Uno de los principales factores que afecta a la creación y a la progresión de estas enfermedades es la placa dental. Se ha demostrado que existe una correlación entre el nivel de placa dental y la severidad de la gingivitis [7]. Debido a esto, la eliminación de placa mediante la higiene personal previene la aparición de enfermedades periodontales; ya que muchas veces los métodos mecánicos (cepillado) no son suficientes para el control de placa, por lo que se ha de adicionar un método químico [1, 7]. El gluconato de clorhexidina se utiliza tanto en pastas dentales como en enjuagues bucales debido a su efectividad en el control de placa, aunque parece tener efectos secundarios como la decoloración marrón de los dientes, la erosión de la mucosa oral o el sabor amargo [7]. La cúrcuma también ha demostrado ser efectiva para el control de placa en combinación con métodos mecánicos, característica que podría deberse a sus propiedades antiinflamatorias que alivian el dolor dental y reducen la hinchazón [1, 7, 4]. Además, impacta reduciendo la población total microbiana [1] e inhibe el desarrollo microbiano que afecta de diversas formas la salud odontológica [8]. En el caso de la salud oral, *Streptococcus mutans* es la principal bacteria responsable de la formación de placa y caries [8], el aceite esencial de cúrcuma inhibe su crecimiento reduciendo la producción de ácido, bajando el pH de la placa dental. Así pues, la inhibición del crecimiento de *S. mutans* conlleva propiedades anticariogénicas [4, 8]. El aceite esencial de cúrcuma también inhibe la formación de placas del microorganismo mencionado que causa periodontitis y caries. Además, la adhesión de *S. Mutans* a la superficie de los dientes es el primer paso para la formación de la placa [8]. En el caso del jengibre, *Zingiber officinale Roscoe*, sus componentes gingerol-[10] y gingerol-[12] presentan propiedades antibacterianas y antifúngicas [9, 10]. Ambos tienen una actividad antimicrobiana frente a bacterias anaeróbicas asociadas con la periodontitis [9]. Cabe destacar que gingerol-[10] además de inhibir el crecimiento microbiano, tiene actividad bactericida [10, 11]. En cuanto a los virus, se ha estudiado el mecanismo del aceite esencial de jengibre, el cual interacciona con la membrana lipídica del virus del herpes simple tipo 1 (HSV-1) causante del herpes oral y de las calenturas, inactivándolo antes de su ingreso a las células [6]. Su efecto antifúngico contra *Candida albicans* lo hace apto para tratar la candidiasis oral [9]. De igual modo, se ha demostrado que varios compuestos del jengibre inhiben el crecimiento de diferentes especies de esta misma levadura [6]. Ambos extractos naturales son efectivos y no tienen efectos tóxicos. Ezzat y Fares [11] quisieron comparar el efecto de la cúrcuma, el jengibre y una mezcla de ambos sobre los síntomas de la periodontitis (estudio sobre roedores). Concluyeron que existe un efecto sinérgico mostrando resultados más prometedores.

Dada la disponibilidad de ambos rizomas en Costa Rica y el interés de contribuir con el desarrollo de la empresa Bioextractos S.A., se plantea la formulación de un enjuague bucal con potencial comercializable, 100% natural, libre de químicos artificiales e incorporando extractos de cúrcuma y de jengibre orgánicos obtenidos en los laboratorios del Centro de Investigación en Protección Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

## Materiales y métodos

### Materiales e insumos

Aceite esencial de jengibre, oleorresina de jengibre y aceite esencial de cúrcuma, agua destilada y el alcohol etílico 96°, emulsionantes no iónicos aceite/agua y/o solubilizante para la producción de preparaciones acuosa, un producto de marca BASF hecho con aceite de ricino hidrogenado, extracto de semilla de toronja con vitamina C como preservante, y como edulcorante natural la *Stevia rebaudiana*, extracto de Menta piperita para replicar la nota tradicional de los productos de higiene oral, tales como pastas dentales y enjuagues bucales.

Se utilizaron vasos de precipitado como contenedores, pipetas para la cuantificación de los extractos, agitadores para el mezclado y una balanza marca Sartorius AND GR-200 con error de 0,01 g.

### Métodos

#### Pruebas preliminares

Se realizó un trabajo preliminar para establecer los parámetros de proceso como el tiempo de mezclado, el orden de la adición de los insumos, la presencia o ausencia glicerina, se probaron diferentes emulsionantes, se ajustaron los porcentajes de alcohol, aceites esenciales y oleorresinas de cúrcuma y de jengibre. Todos los valores se determinaron en la fase preliminar, basados en la aceptación del sabor y la apariencia.

#### Método de mezclado en la formulación del producto

El mezclado de los ingredientes fue manual. Primero se mezcló el agua y el etanol con el extracto de Stevia, lo que se denominó como pre-mezcla. Aparte se realizó una pre-emulsión con el resto de los componentes. Con agitación continua, se incorporó lentamente en un período de 60 segundos la pre-emulsión a la pre-mezcla.

#### Análisis Sensorial

Una vez terminadas las formulaciones, se realizaron evaluaciones de ambas propuestas, neutra y pungente. Se realizaron dos pruebas hedónicas de aceptación y de preferencia ante un panel constituido por 50 posibles consumidores no entrenados, en tres tiendas de productos naturales ubicadas en las provincias de San José y de Heredia (Costa Rica). Se inició con la catación del enjuague neutro y luego se valoró la variante pungente para evitar sesgos asociados al sabor residual del producto pungente. En la prueba de aceptación se evaluaron los atributos color, olor, sabor y agrado general mediante una escala hedónica de 10 puntos, siendo 1 “no me disgusta extremadamente” y 10 “me gusta extremadamente”. La rúbrica de preferencia consistió en una prueba de orden de productos según predilección, siendo 1 el más preferido y 2 el menos preferido. Bajo la premisa de una distribución normal en los datos, el valor medio  $\bar{X}$  y su dispersión representada por una desviación estándar ( $s$ ), en donde se generaron límites de confianza ( $\pm 1s$ ). Los datos fueron analizados tras el cálculo de promedios y valorando su dispersión al establecer los límites; sumando y restando la desviación estándar.

#### Análisis fisicoquímicos

Se analizó el pH y se estimó gravimétricamente el contenido porcentual de etanol.

## Resultados y discusión

### Formulación del enjuague

Se formularon dos enjuagues bucales, uno de sabor neutro y otro con un efecto pungente producto de la adición de aceite esencial de jengibre. Ambas están compuestas por sustancias beneficiosas para la salud dental, además de múltiples bondades para las encías, por contener ingredientes bioactivos procedentes de las esencias de la cúrcuma y del jengibre que reducen el índice de formación de placa (PI), el índice gingival (GI) y el conteo bacteriano, sin necesidad de usar sustancias artificiales [8, 9, 10].

Ambos productos incoloros, de apariencia translúcida y homogénea, sin materiales precipitados, con pH neutro de  $(7.06 \pm 0,10)$  y un contenido promedio de etanol de  $(10.05 \pm 0,13)$ , cantidad suficiente para garantizar la vida de anaquel y que no resulte tan irritante como otros disponibles en el mercado.

Al momento de la formulación, se presentó en el producto final una turbidez indeseable generada por la fase aceitosa, cuya eliminación representó el principal desafío del desarrollo. Para resolver este aspecto técnico, se ensayó con diferentes sustancias emulsionantes y variaciones en sus concentraciones, resultando favorable el uso del aceite de ricino en un 2%, suficiente para eliminar dicha turbidez y obtener una emulsión estable y translúcida.

El dulzor se obtuvo mediante el extracto de Stevia, como su poder edulcorante es 300 veces más que el de la sacarosa se usa en una cantidad equivalente a un 10°Brix. Otro aspecto de relevancia para la calidad y aceptabilidad del producto fue la remoción de la resina de cúrcuma, para evitar una coloración amarillenta no conveniente en el producto final. La versión pungente se logró utilizando una cantidad adicional de oleoresina de jengibre (0,5 mL/L).

### Análisis sensorial

Entre las versiones neutra y pungente del producto se da una sustancial diferencia que se valida con la preferencia manifestada por parte de los panelistas. El 66% de éstos mostraron preferencia por la formulación neutra, contra un 33% que seleccionó la versión pungente, lo cual revela una diferenciación de los atributos a nivel de aceptación. En el cuadro 1 se presentan los datos resultantes del ensayo sensorial.

**Cuadro 1.** Valores promedios del análisis sensorial para un tamaño de muestra de 50 panelistas.

Enjuague	Color	Olor	Sabor	Dulzor	Pungencia	Agrado general	Preferencia
Neutro	7,7	8,4	8,2	8,3	n.a.	8,2	28
Pungente	6,8	7,2	7,3	8,2	5,3	6,6	14

La formulación de enjuague neutro resultó superior en todos los rubros analizados, respecto de la versión pungente. El puntaje promedio en la evaluación de Pungencia fue un 5,3 de 10, con un Agrado general de 6,6 lo cual refuerza la preferencia por el producto neutro, el cual fue calificado en agrado general con un promedio de 8,2.

## Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de ambos enjuagues bucales fue exitoso según los parámetros de color, olor, sabor y dulzor, especialmente para el enjuague neutro. Para el caso del enjuague pungente, se recomienda ensayar diferentes concentraciones de aceite esencial de jengibre de manera que se atenúe la sensación pungente, dado que cobra gran interés el uso del jengibre por la capacidad de potenciar el efecto anti-bacterial si se combina con la cúrcuma.

Algunos aspectos no contemplados en el ensayo sensorial pueden ser objeto de estudios complementarios que conduzcan a una mejora significativa del producto. En ese sentido el complemento de sabor/aroma introducido por la menta puede valorarse, incluso ampliarse a otros extractos naturales como romero, lavanda, canela y jazmín que han sido ya implementados en la industria de pastas dentales.

Se logró un producto de apariencia translúcida y homogénea muy favorable, sin embargo, el aporte de pigmentación vegetal puede resultar en un complemento funcional del producto, por eso puede incluirse en desarrollos futuros mediante aditivos como clorofila y antocianinas.

A nivel de mercado se puede optimizar el diseño del producto mediante un muestreo que considere un mayor tamaño de muestra y de esta forma reducir la dispersión de los datos.

En cuanto al control de calidad del producto y para un posible escalamiento es recomendable desarrollar varias métricas para producto final. Si bien la comunidad científica ha validado con estudios muy específicos la función antiinflamatoria, antiséptica, bactericida y fungicida, conviene realizar como mínimo una investigación sobre la vida útil del producto final, pues la composición del producto incluye bioactivos muy sensibles a las condiciones de almacenamiento, mediante un seguimiento colorimétrico, densimetría alcohólica, merma de sustancias volátiles, pH, recuento total bacterias, mohos y levaduras.

## Agradecimiento

Se agradece a la empresa Verdenergía por el suministro de la cúrcuma y el jengibre orgánicos frescos. Al personal del CIPA por el aporte de insumos, equipo e instalaciones para el procesamiento. A la empresa Bioextractos S.A. por el involucramiento en el desarrollo de productos. Al estudiante Denis Oviedo Hernández por la colaboración a lo largo del proyecto.

## Referencias

- [1] M. Nagpal y S. Sood, «Role of curcumin in systemic and oral health: An overview,» *Journal of natural science, biology, and medicine*, vol. 4, n° 1, pp. 3-7, 2013.
- [2] M. U. Akbar, K. Rehman, K. M. Zia, ,. M. I. Qadir, M. S. Hamid Akash y M. Ibrahim, «Critical Review on Curcumin as a Therapeutic Agent: From Traditional Herbal Medicine to an Ideal Therapeutic Agent,» *Eukaryotic Gene Expression*, vol. 28, n° 1, pp. 17-24, 2018.
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS), «Salud Bucodental,» 2012.
- [4] J. Kuwatada, M. Raja y P. Sood, «Turmeric: A Boon to Oral Health,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ORAL CARE & RESEARCH*, vol. 5, n° 3, pp. 338-341, 2017.
- [5] P. Saiz de Cos, «Cúrcuma I (Curcuma longa L.),» *Reduca (Biología). Serie Botánica.*, vol. 7, n° 2, pp. 84-99, 2014.
- [6] R. Sudarshan y R. S. Vijayabala, «Role of Ginger in Medicine and Dentistry- An Interesting Review Article,» *The Southeast Asian Journal of Case Report and Review (SEAJCRR)*, vol. 1, n° 3, pp. 66-72, 2012.
- [7] P. F. Waghmare, A. U. Chaudhari, V. M. Karhadkar y A. S. Jamkhande, «Comparative evaluation of turmeric and chlorhexidine gluconate mouthwash in prevention of plaque formation and gingivitis: a clinical and microbiological study,» *J Contemp Dent Pract*, vol. 12, n° 4, pp. 221-4, 2011.



- [8] K. H. Lee, B. S. Kim, K. S. Keum, H. H. Yu, Y. H. Kim, B. S. Chang, J. Y. M. H. D. Ra, B. R. Seo, N. Y. Choi y Y. O. You, «Essential oil of *Curcuma longa* inhibits *Streptococcus mutans* biofilm formation,» *J Food Sci*, vol. 76, n° 9, pp. H226-30, 2011.
- [9] C. Ficker, M. L. Smith, K. Akpagana, M. Gbeassor, J. Zhang, T. Durst, R. Assabgui y J. T. Arnason, «Bioassay-guided isolation and identification of antifungal compounds from ginger,» *Phytother Res*, vol. 17, n° 8, pp. 897-902, 2003.
- [10] M. Park, J. Bae y D. S. Lee, «Antibacterial activity of [10]-gingerol and [12]-gingerol isolated from ginger rhizome against periodontal bacteria,» *Phytother Res*, vol. 22, n° 11, pp. 1446-9, 2008.
- [11] B. A. Ezzat y A. E. Fares, «THE EFFECT OF ORALLY ADMINISTERED CURCUMIN AND /OR GINGER ON ESCHERICHIA COLI INDUCED PERIODONTITIS IN RATS (HISTOPATHOLOGICAL, IMMUNOHISTOCHEMICAL, AND STEREOMICROSCOPIC STUDY),» *E.D.J*, vol. 60, n° 2, pp. 1465-1477, 2014.
- [12] K. L. Porras, «El mercado de productos orgánicos: oportunidades de diversificación y diferenciación para la oferta exportable costarricense,» Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica Dirección de Inteligencia Comercial, 2011.
- [13] J. Ziegler, «GLOBAL FOOD & DRINK TRENDS 2018,» MINTEL, 2018.
- [14] N. Vidal, «La era saludable: Alimentos funcionales, nutricosmética y nutraceuticos,» AINIA Centro Tecnológico, 2016.
- [15] J. A. L. Sánchez, «Propuesta de un modelo logístico para implementar un sistema de distribución compartida para Coca-Cola FEMSA de Costa Rica S.A.,» Universidad de Costa Rica, San José, 2006.
- [16] H. Pérez Leonard, «Nutracéuticos: componente emergente para el beneficio de la salud,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XL, n° 3, pp. 20-28, 2006.
- [17] IBS Soluciones Verdes & Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG), «Estudio sobre el entorno nacional de la agricultura orgánica en Costa Rica,» Programa Nacional de Agricultura Orgánica, San José, 2013.
- [18] C. O. Pascual, «ALIMENTOS SALUDABLES. TENDENCIAS DE CONSUMO Y OPORTUNIDADES DE MERCADO,» de *Foro Healthy Food Rioja*, La Rioja, 2017.
- [19] E. T. N. D. G. A. Pacheco-Delahaye, «ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE POLVOS PARA BEBIDAS INSTANTÁNEAS A BASE DE HARINA EXTRUDIDA DE ÑAME (*Dioscorea alata*),» *Revista Chilena de Nutrición*, vol. 35, n° 4, pp. 452-459, 2008.
- [20] H. W. & J. Lernoud, «The world of organic agriculture: STATISTICS & EMERGING TRENDS 2017,» Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and IFOAM – Organics International., Frick, Switzerland, 2017.
- [21] INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos), «VI Censo Nacional Agropecuario. Atlas Estadístico Agropecuario,» Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica, 2015.
- [22] «Alimentos funcionales, nutricosmética y nutraceuticos,» *Enfoque Alimentos*, vol. 30, pp. 34-37, 2018.
- [23] A. Yeung, W. K. Mocan, A. Atanasov y A. G., «Let food be thy medicine and medicine be thy food: A bibliometric analysis of the most cited papers focusing on nutraceuticals and functional foods,» *Food Chemistry*, vol. 269, pp. 455-465, 2018.
- [24] J. Flórez Flórez, C. Góngora, I. D. Pacheco y L. Ortegón, «Análisis de consumo de los alimentos funcionales. Exploración de percepción de producto, marca y hábitos de consumo a partir de los cereales light,» *Libre Empresa*, vol. 11, n° 1, pp. 119-136, 2014.
- [25] A. Valenzuela B, R. Valenzuela, J. Sanhueza y G. Morales I, «Alimentos funcionales, nutraceuticos y foshu: ¿vamos hacia un nuevo concepto de alimentación?,» *Revista Chilena de Nutrición*, vol. 41, pp. 198-204, 2014.

# Determinación de los principales factores que influyen en las lesiones músculo esqueléticas de los trabajadores del Mercado Central de Cartago, Costa Rica

## Factors that influence in musculoskeletal injuries in the premises of the Central Market of Cartago, Costa Rica

Ara Villalobos Rodríguez<sup>1</sup>, Miriam Brenes-Cerdas<sup>2</sup>

Villalobos-Rodríguez, A; Brenes-Cerdas, M. Determinación de los principales factores que influyen en las lesiones músculo esqueléticas de los trabajadores del Mercado Central de Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 105-116.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4469>



- 1 Ingeniera. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Costa Rica. Correo electrónico: avillalobos@tec.ac.cr  
 <https://orcid.org/0000-0003-3340-8136>
- 2 Ingeniera. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Costa Rica. Correo electrónico: mibrenes@tec.ac.cr  
 <https://orcid.org/0000-0001-8850-8359>

## Palabras clave

Mercado; factores músculo esqueléticos; manejo manual de cargas; riesgos.

## Resumen

Las lesiones músculo-esqueléticas tienen un costo considerable para el sistema de salud pública [1], es por ello que el objetivo del proyecto fue contribuir al mejoramiento del ambiente de trabajo en las pequeñas y medianas empresas (PYME), por medio de la determinación de los factores que influyen en las lesiones músculo-esqueléticas en las operaciones de manejo manual de cargas. Para ello se hizo uso del método MAC y de equipos de medición como los dinamómetros y relojes polar. Factores como el peso de las cargas, el traslado de éstas a lo largo de distancias mayores a los 150 m, además de la forma y tamaño de las mismas, aumentan la frecuencia cardiaca en los trabajadores. Los resultados obtenidos evidencian que las tareas de transporte, levantamiento y acomodo de los productos, son clasificadas como riesgo crítico, debido a que son realizadas de forma incorrecta por los trabajadores; siendo el principal riesgo el biomecánico, debido a peligros como las posturas inadecuadas y prolongadas, manejo de cargas por espacios reducidos y en locales con dimensiones insuficientes, aunados a las características personales como la escasa actividad física, y la forma en las que se realizan las tareas, en donde predomina el esfuerzo muscular dinámico. Esta información es la base para que, a nivel de locales del Mercado Central de Cartago se realice una evaluación de riesgos a detalle, que permita adoptar medidas necesarias en lo que concierne a la formación de métodos de trabajo y medios técnicos apropiados en el transporte y manejo de carga.

## Keywords

Market; musculoskeletal factors; manual handling of heavy loads; risks.

## Abstract

The muscular- skeletal injuries have a considerable cost for the public health[1], which is why the objective of the project was to contribute to the improvement of the work environment in the small and medium-sized enterprises, through the determination of the factors that influence in the muscular-skeletal injuries in manual handling of heavy loads operations. For it, the MAC method and measurement equipment like dynamometers and Polar watches were used to determine if the weight, distance, shape and size of the loads were a risk factor.

The results reveal that the tasks of transportation, lifting and accommodation of the products were classified as critical risk, caused by incorrectly handling, the main risk detected was the biomechanical, derived of inadequate and prolonged positions, narrow corridors and small establishments; this added to the personal characteristics like low physical activity, and in the way the tasks are done wherein predominate the dynamic muscular effort. With this information the Central Market of Cartago, can make a risks evaluation in detail, also allow to adopt necessary measures regarding the formation of working methods and technical means appropriate in transport and load handling.

## Introducción

En los últimos años los gobiernos de América Latina y el Caribe han impulsado a las PYME por medio de programas de apoyo, lo que ha mejorado el desempeño económico y productivo de las mismas [2], sin embargo, las iniciativas desarrolladas en la mayoría de los casos no consideran el aspecto de la salud laboral.

Las lesiones músculo esqueléticas se han convertido en uno de los principales problemas de salud en el trabajo y causa de ausentismo laboral, con repercusiones económicas importantes para el trabajador, la empresa y la sociedad en general [3]; [4] además de una disminución en la productividad, alteración en la calidad de vida del trabajador, entre otras consecuencias [5]. El principal problema asociado a estas lesiones son las lumbalgias, producto de las tareas relacionadas con el levantamiento manual de cargas [6]; [7].

Además de las lumbalgias, los trastornos músculo esqueléticos se relacionan con una amplia gama de enfermedades que pueden provocar deterioro funcional de otras zonas del cuerpo, como el cuello, hombros, muñecas, manos [8].

Los trastornos músculo-esqueléticos, según el informe de la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo, son el problema de salud laboral más común en Europa [9]. Situación no ajena a nuestro país, en donde de acuerdo al informe proporcionado por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social [10], los accidentes por sobrecarga física ocupan el segundo lugar, correspondientes a 18.108 accidentes, que representan el 16% del total, fundamentalmente por sobreesfuerzos, manejo manual de cargas y trabajo dinámico.

Con el objetivo de evaluar los principales factores que influyen en las lesiones músculo-esqueléticas, se analizaron las actividades concernientes al manejo manual de cargas, que se efectúan en empresas PYME, específicamente las que se desarrollan por un grupo de trabajadores del Mercado Central de Cartago, debido a que este tipo de tarea está presente en la mayoría de las actividades que en dicho centro de trabajo se realizan, además que el entorno en donde se desarrollan las mismas, en la mayoría de las ocasiones es reducido, por lo que el riesgo aumenta.

Para alcanzar esos resultados se plantearon como objetivos el identificar las actividades realizadas por los trabajadores en las operaciones de manejo manual de cargas de los locales del mercado, que influyen en la ocurrencia de lesiones músculo esqueléticas, para posteriormente realizar la evaluación, y por último establecer recomendaciones generales dirigidas a la población en estudio.

## Materiales y métodos

La población en estudio corresponde a los trabajadores del Mercado Central de Cartago (122 en total), la muestra varió, según la herramienta a aplicar. El estudio fue de tipo exploratorio en una muestra representativa seleccionada aleatoriamente, sobre la cual se aplicaron cuestionarios, con el fin de recibir retroalimentación de las actividades que realizan los trabajadores del mercado en las operaciones de manejo manual de cargas, también se efectuaron evaluaciones en las cuales se hizo uso de equipos que permitieron establecer la fuerza inicial y mantenida y el consumo metabólico, para determinar la intensidad del trabajo realizado.

## Entrevista

Con el fin de identificar el peso de las cargas que los trabajadores levantan, en ella participaron 108 encargados de locales o sus representantes (los 14 restantes indicaron que no podían brindar ningún tipo de información, por motivos de confidencialidad).

## Cuestionario

Aplicado a 86 trabajadores (la muestra elegida fue no probabilística seleccionada a conveniencia, debido a que se consideró trabajar con 1 persona por cada local, que, según la información de la entrevista, levantaban cargas de más de 20kg, las cuales si se levantan con ambas manos la energía por kg y por metro de trabajo debe corresponder a un peso de 20 a 25 kg [11]. El objetivo de la aplicación de este instrumento era conocer más a detalle las actividades realizadas por los trabajadores en las operaciones de manejo manual de cargas, como lo es la información relacionada al tipo de labor, historial ocupacional y médico; con esto se pretendía conocer algunos de los factores de riesgo relacionados a la tarea y a las personas. Posterior a esta intervención se efectuaron reuniones en donde se invitaron a todas las personas que participaron del cuestionario, con el fin de explicarles a detalle las actividades que se iban a desarrollar en el proyecto, sin embargo, a las mismas solamente asistieron 14 personas que indicaron su anuencia a seguir colaborando, por lo que esta cantidad representa los locales a trabajar.

## Observación no participativa

En donde se consideraron elementos como la técnica de levantamiento, formas, tamaños y materiales de las cargas, además de las condiciones del entorno de los locales (dimensiones, pasillos).

## Evaluación de las operaciones que involucran un manejo manual de cargas que influyen en la ocurrencia de lesiones músculo esqueléticas

Para esto se hizo uso de los métodos que se comentan a continuación:

### *Método MAC*

Previo al desarrollo de método, se aplicó una observación no participativa, para obtener información de la técnica de levantamiento, formas, tamaños y materiales de las cargas, además de las condiciones de la infraestructura, esto durante toda la jornada; tomando videos y fotografías de las actividades. Dicha metodología fue adaptada a las necesidades del proyecto (específicamente para operaciones de levantamiento y transporte), y se aplicó a 17 trabajadores (un trabajador para cada uno de los 14 locales participantes, sin embargo, en la carnicería se evaluaron 4 trabajadores, debido a que en el manejo manual de materiales que ellos realizan se ven comprometidas más partes del cuerpo), para posteriormente categorizar con base en los parámetros que establece el método, las actividades según los resultados alcanzados.

### *Mediciones de variables*

Para el objetivo de evaluar las operaciones que involucran un manejo manual de cargas que podrían influir en la ocurrencia de lesiones músculo-esqueléticas; se trabajó con 17 trabajadores, a quienes se les realizaron mediciones (al final de la jornada) según la posición, para ambos brazos y manos con el dinamómetro, comparando los resultados con los valores según la edad, establecidos por el Programa de Terapia Ocupacional de la Universidad de Wisconsin- Milwaukee sobre los Datos Normativos para el agarre y la fuerza de pinza [12], y evaluación de la carga metabólica que se estableció a través de la técnica de medición de la frecuencia cardiaca promedio, gasto metabólico y edad de los trabajadores [13], mediante el uso de los datos obtenidos con el uso del reloj POLAR (modelo FT4).

### *Evaluación de riesgos*

Se hizo uso de la Norma técnica INTE 31-06-07-2011 Guía para la identificación de los peligros y la evaluación de los riesgos de salud y seguridad ocupacional.

## Resultados

### Generalidades

En la primera intervención (entrevista), se contó con la participación de dueños o encargados de 108 locales, en donde en el 80% de ellos se manipulan pesos superiores a los 20 kg, debido a que los pesos de 20 a 25 kg [11], resultan difíciles de manipular para la mayoría de las personas, convirtiéndose en un factor que influye en la ocurrencia de lesiones músculo esqueléticas. Con esta información se procedió a aplicar un cuestionario (n=86), donde se obtiene que el 83% de la población son hombres; de ellos, la mayoría con edades en el rango de los 18 a 54 años, correspondiendo a un 82%, el 18% restante con 54 o más de 65 años, que, aunque representen el menor porcentaje, es un elemento importante a considerar, debido a que la probabilidad de sufrir trastornos dorsolumbares se incrementa con la edad, [14]. Es importante destacar que la capacidad en las facultades físicas (fortaleza muscular), en la tareas que exigen un alto nivel de destreza (como los ejecutados por los trabajadores del Mercado Central de Cartago), declina a medida que aumenta la edad [15], debido al deterioro sufrido por el organismo, producto del envejecimiento en personas mayores a 50 años [16], incluso de acuerdo a una investigación realizada [17], este es uno de los factores más influyentes en los problemas músculo esqueléticos.

En el cuestionario se consultó sobre la actividad física que realizan los trabajadores fuera de su jornada laboral, el 50% de los entrevistados indicó que realiza ejercicios regularmente y de éstos, la mayoría practican algún tipo de ejercicio al menos una vez a la semana.

Con respecto a la frecuencia de transporte de cargas, de acuerdo a las personas entrevistadas la mayoría (79%), realiza una manipulación de las mismas por menos de 30 minutos al día, lo que representa poco tiempo de la jornada laboral. Para los trabajadores que realizan manejo de cargas con una mayor frecuencia, se debe considerar que el resto del tiempo laboral es recomendable dedicarlo a actividades menos pesadas y que no impliquen la utilización de los mismos músculos, con el objetivo de que se logre su recuperación física [18].

Por ello se consultó a los participantes del cuestionario sobre las molestias que presentan actualmente en relación a su actividad laboral; de acuerdo a los resultados, la zona más afectada es la espalda dorsal, seguido del cuello, hombros, piernas y espalda lumbar respectivamente.

Como se indicó anteriormente, los trabajadores que participaron del cuestionario de dolencias manipulan pesos mayores a 20Kg, y con base en las observaciones no participativas se determinó que el 100% de las personas no ejecutan la técnica correcta para el levantamiento manual de cargas, además las mismas son de diferentes tamaños (desde verduras en presentación individual hasta sacos de producto), materiales y formas, lo que en ocasiones dificulta la forma de agarre (como es el caso de las bandejas de los huevos, debido a que las estibas de cartón son inestables). Esta condición, en la forma y tamaño de las cargas, ocasiona que sean de difícil agarre, debido a que si la misma es muy ancha el colaborador se ve obligado a mantener posturas forzadas de los brazos, complicando el agarre [18], aumentando la probabilidad de que el objeto se resbale y provoque un accidente [14], por lo que según una investigación realizada [19], las posturas forzadas son uno de los factores de riesgo asociadas al levantamiento y transporte manual de cargas, principales actividades desarrolladas por los trabajadores del Mercado.

*Condiciones del entorno:* Con respecto al entorno, según las visitas realizadas a los locales de trabajo se observó que el piso, en algunas ocasiones es resbaladizo (húmedo) o desigual, el acceso a las áreas de almacenamiento a los locales es reducido, los pasillos no cumplen con las dimensiones mínimas establecidas en Reglamento a la Ley de igualdad de oportunidades para personas con discapacidad [20], que establece una dimensión de 1,2 metros para los pasillos de uso común; además el espacio de trabajo para algunos de los locales no cumple

con 2m<sup>2</sup> libres por trabajador, siendo inferior a lo establecido en nuestra legislación [21], ni la altura que es inferior a dos metros y medio; por lo que la condición actual provoca que se tomen posturas incómodas.

*Evaluación de las operaciones que involucran un manejo manual de cargas que influyen en la ocurrencia de lesiones músculo esqueléticas:*

*Tablas MAC:* Con este instrumento se evaluaron 6 de los 17 puestos (eligiendo uno por tipo de local, debido a que realizan las mismas actividades), en donde los traslados de los materiales comprometen diversas partes del cuerpo de los trabajadores como lo son la espalda, piernas, brazos y manos, además, de que no se utilizan ayudas mecánicas para realizar estas tareas.

En el cuadro 1 se indica el resumen de los datos obtenidos con este instrumento.

**Cuadro 1.** Resultados finales según método MAC

Número de Local / oficio	Puntuación numérica total por tarea			Total
	Levantar	Equipo	Transportar	
Local 128, Carnicería	22		22	66
Local 82 Abastecedor	17	17	17	51
Local 170 Pescadería	14	14	14	42
Local 66 Verdulería	15	12	15	42
Local 24 Huevos y Pollos	10	10	12	32
Local 10 Productos Agrícolas	13	10	9	32

Los casos en donde el valor resultó más alto corresponden a las labores realizadas en la carnicería y abastecedor. Específicamente para la carnicería, de las actividades evaluadas, el acarreo de carne resultó con mayor puntaje debido a los siguientes factores: la postura de la espalda del trabajador al momento de traslado de las piezas de carne, la distancia de recorrido que el trabajador realiza (en promedio 180 metros, la cual varía dependiendo de donde se estacione el camión que les provee la mercadería en la periferia del Mercado Municipal), desde el exterior del mercado hacia el local. Bajo esta condición, se presenta un aumento de la fuerza de tensión en el disco vertebral [22], viéndose comprometido el sistema cardiovascular, debido a que a distancias de más de 50 m el consumo de oxígeno y la frecuencia cardiaca aumentan [11], sumado a esto, se cuenta con pesos manipulados en algunos casos superiores a 150 kilos colocados en la espalda, que según una investigación realizada en trabajadores de mercados mayoristas en Perú, los sacos con estos pesos ocasionan que el proceso de trabajo sea riesgoso para la salud de las personas expuestas, debido al peso extremadamente excesivo [23]. Lo que podría aumentar la probabilidad de un accidente laboral en el traslado, así como incrementar las lesiones, debido a que [24], el manejo y levantamiento de cargas son las principales causas de lumbalgia y hernias de disco [25], que conllevan a periodos prolongados de recuperación. En muchas ocasiones, porque cuando la persona es consciente del problema, la lesión por lo general está en un estado avanzado de evolución [26]. Incluso, como se indicó anteriormente, la zona más afectada manifestada por los trabajadores corresponde a la espalda dorsal, seguida del cuello, hombros, piernas y espalda lumbar, lo cual se puede comparar con los datos reportados en una investigación realizada [23], en donde la lumbalgia y la hiperxifosis dorsales son las patologías más frecuentes, relacionadas con el manejo de cargas.

En el local denominado abastecedor, los trabajadores realizan la tarea de traslado de sacos que contienen granos, llevándoles en la espalda, por razones como la rapidez para la realización de la tarea, además el poco espacio en pasillos y al almacenamiento de productos en las zonas de paso, lo que les dificulta el traslado de los mismos, comprometiendo el desplazamiento y la agilidad del trabajador. En el siguiente apartado sobre la fuerza relacionada con la tarea, se podrá apreciar como la misma resulta afectada debido a las actividades que se desarrollan.

*Fuerza relacionada con la tarea:* Se indican en el cuadro 2 los resultados de todas las evaluaciones realizadas con el dinamómetro a los trabajadores participantes en el estudio. En todos los casos evaluados la mano predominante es la derecha, sin embargo, las comparaciones de los resultados con lo establecido en los datos normativos para agarre y fuerza de pinza, se realizaron para ambas manos.

En el 82% de los casos, el valor al inicio de la jornada es mayor en ambas manos que al finalizar la misma, lo que demuestra que la fatiga al realizar la tarea y la condición en la que se desarrolla, son factores importantes que afectan la fuerza [27]. En el caso de la comparación de la fuerza con el valor recomendado en la mano según la edad, solamente se supera en un 29% de los casos, situación que podría ocasionar una mayor fatiga en el trabajador, debido a que se estaría realizando un esfuerzo mayor al levantar las cargas.

Los cuatro trabajadores de la Carnicería, presentan datos de fuerza de presión mayor al valor recomendado, lo que podría deberse a que ellos constantemente ejercitan sus manos utilizándolas para el corte y destace de la carne, además de que son los que manejan pesos mayores como se comentó anteriormente, un dato interesante es que el mayor esfuerzo lo realizan solamente en las dos primeras horas de la jornada de trabajo, momento en que trasladan y destazan la carne en los diversos cortes para la venta. De igual manera sucede con el trabajador 6 de pescadería, que cuenta con 18 años, el cual supera el parámetro de referencia, por lo que se podría pensar que el factor edad podría ser favorable por ser más joven que el resto, ya que la capacidad de trabajo físico disminuye conforme aumenta la edad [28].

*Consumo metabólico relacionado con la tarea:* Se obtuvo mediante la conversión de la frecuencia cardiaca a carga metabólica [13], alcanzando valores en el caso de un trabajador de 6004 kcal. durante su jornada laboral.

De acuerdo a “Cortés Díaz [29]”, el metabolismo para actividades laborales que suponen la realización de esfuerzo estáticos y dinámicos (como en el caso de los trabajadores del Mercado) está comprendido entre 2000 y 2500 kcal/día, por lo que en el 35% de los casos evaluados se alcanza ese valor o se sobrepasa, lo que podría generar fatiga.

Con base en esta información, se procedió a establecer la tasa metabólica para cada uno de los trabajadores, para luego comparar con el Anexo A de la UNE EN ISO 8996, que establece ese dato para diferentes ocupaciones. Los resultados mayores fueron obtenidos para los puestos de carnicería con valores que van de los 268 a 334.4 W/M<sup>2</sup>.

Para clasificar la ocupación según lo establecido en la norma indicada anteriormente, Tabla A.1, se utiliza la referencia de dependiente de comercio, que establece un valor de 100 a 120 W/m<sup>2</sup>, y el de carnicero 105 a 140 W/m<sup>2</sup>, por lo que según los resultados obtenidos solamente cuatro de los casos analizados (24%) se mantienen por debajo de esa tasa metabólica, para el resto de los puestos se supera, situación que se puede deber a que las actividades que los trabajadores realizan involucran no solamente el vender el producto, sino también como se ha comentado, el manipular las cargas por lugares externos a su puesto de trabajo.

Al comparar los valores obtenidos en la tasa metabólica con la Tabla A.2 de la norma de referencia se obtiene que, según el tipo de actividad los trabajadores de carnicería tienen una tasa metabólica alta, asociada con trabajo intenso con brazos y tronco [13].

**Cuadro 2.** Datos de los trabajadores evaluados con dinamómetro antes y después de manipular cargas

Número de trabajador	Edad	Género	Tipo de local	Momento de la jornada	Mano der. (Fuerza)	Mano izq (Fuerza)	Valor recomendado mano (dominante/ No dominante) (libras)
1	49	M	Verdulería	Inicio	110 libras	88 libras	109,9 / 100,8
				Final	93 libras	88 libras	
2	27	M	Pescadería	Inicio	110 libras	88 libras	120,8/110,5
				Final	99 libras	79 libras	
3	26	M	Pollo-huevos	Inicio	73 libras	66 libras	120,8/110,5
				Final	88 libras	77 libras	
4	41	M	Soda	Inicio	77 libras	84 libras	116,8/112,8
				Final	86 libras	90 libras	
5	54	M	Verdulería	Inicio	66 libras	55 libras	113,6/101,9
				Final	66 libras	59 libras	
6	17	M	Pescadería	Inicio	140 libras	120 libras	121 /104,5
				Final	130 libras	118 libras	
7	38	M	Productos agrícolas	Inicio	115 libras	98 libras	119,7/112,9
				Final	100 libras	80 libras	
8*	42	M	Abastecedor	Inicio	25 libras	70 libras	116,8/112,8
				Final	38 libras	77 libras	
9	30	F	Soda	Inicio	60 libras	55 libras	78,7 /68
				Final	57 libras	50 libras	
10	42	F	Soda	Inicio	52 libras	45 libras	70,4/62,3
				Final	48 libras	40 libras	
11	38	M	Productos agrícolas	Inicio	85 libras	87 libras	119,7/112,9
				Final	85 libras	78 libras	
12	40	M	Carnicería	Inicio	183 libras	176 libras	116,8/112,8
				Final	176 libras	172 libras	
13	58	M	Carnicería	Inicio	150 libras	106 libras	101,1/83,2
				Final	141 libras	99 libras	
14	45	M	Carnicería	Inicio	181 libras	137 libras	109,9 / 100,8
				Final	172 libras	128 libras	
15	65	M	Carnicería	Inicio	133 libras	133 libras	91,1/76,8
				Final	128 libras	121libras	
16	57	F	Soda	Inicio	33 libras	25 libras	57,3/47,3
				Final	30 libras	20 libras	
17	52	M	Verdulería	Inicio	72 libras	65 libras	113,6/101,9
				Final	70 libras	58 libras	

Nota:\* lesión en mano derecha  
En color azul: trabajadores que superan los parámetros

## Evaluación de riesgos

Se procedió a elaborar una matriz de riesgo, en donde se integra toda la información, con el objetivo de priorizar los riesgos a los que se exponen los trabajadores del mercado.

Como se puede observar en el cuadro 3, en las tareas de levantamiento y traslado de cargas, así como en las de acomodo de producto, es donde se presentan los riesgos no aceptables (nivel de riesgo I), que generan peligros como posturas inadecuadas o prolongadas durante la jornada, los cuales pueden tener efectos como lumbalgias y problemas circulatorios. Además, el traslado de las cargas, al realizarse en espacios tan reducidos y con productos al hombro en muchas ocasiones, se pueden generar cervicalgias, o bien consecuencias relacionadas con el entorno por donde se transita como caídas y golpes; por lo cual según la norma INTE de referencia [30], son los que requieren de una intervención inmediata para disminuir el nivel de riesgo, correspondiendo a una situación crítica.

**Cuadro 3.** Matriz de riesgos

Tareas	Peligro		Efectos posibles	Evaluación del riesgo						Valoración del riesgo	
	Descripción	Clasificación		ND	NE	NP	INP	NC	NR e intervención	Interpretación de NR	Aceptabilidad del riesgo
Levantamiento de cargas	Posturas inadecuadas	Biomecánico	Lumbalgias	10	3	MA-30	Muy alto	60	1800	I	No
Traslado de cargas	Manejo de cargas por espacios reducidos	Biomecánico y seguridad	Lumbalgias y cervicalgias. Caídas y golpes	10	2	A-20	Alto	60	1200	I	No
Corte y destace*	Movimientos repetitivos, posturas incómodas y manejo inadecuado de	Biomecánico y mecánico	Síndrome del túnel de carpo, tendinitis. Heridas	6	2	A-12	Alto	25	300	II	No
Venta de producto	Posturas prolongadas (según local estáticas o dinámicas)	Biomecánico	Lumbalgias, problemas circulatorios	2	4	M-8	Medio	10	80	III	Sí

\* Actividad exclusiva para los locales de pescadería y carnicería

Nota: ND: Nivel de deficiencia. NE: Nivel de exposición. NP: Nivel de probabilidad. INP: Interpretación del nivel de probabilidad. NC: Nivel de Consecuencia. NR: Nivel de riesgo.

Los riesgos medios (nivel de riesgo II) se encontraron en las actividades corte y destace (que corresponden a tareas que se realizan únicamente en los locales de pescadería y carnicería), pues en estos se generan movimientos repetitivos, posturas incómodas, un manejo inadecuado

de las herramientas que utilizan, así como el piso húmedo; además hay contacto con la sangre de los animales; todas estas condiciones pueden producir efectos a la salud tales como: síndrome del túnel carpal y tendinitis, enfermedades relacionadas por el contacto con los animales, además de caídas, heridas y golpes. Estos riesgos deben ser corregidos pues se clasifican como no aceptables al no tener controles establecidos.

## Conclusiones

En los locales evaluados en el Mercado Municipal de Cartago, todos los trabajadores realizan manejo manual de cargas, que se relaciona a las molestias manifestadas a nivel de espalda dorsal, lumbar, cuello, hombros, y piernas, que podrían generar lesiones músculo esqueléticas si no se llegan a establecer controles adecuados.

En las actividades que se realizan, existen elementos como el peso, la forma y tamaño de las cargas, las distancias de recorrido, así como las características de los locales y de los trabajadores, que se convierten en factores de riesgo asociados a las operaciones de transporte, levantamiento y acomodo de los productos, que según la evaluación realizada se clasifican como críticos (Nivel I).

El principal riesgo corresponde al biomecánico, debido a peligros como las posturas inadecuadas y prolongadas, manejo de cargas por espacios reducidos y en locales con dimensiones insuficientes, aunados a las características personales como la escasa actividad física, y un alto consumo metabólico producto de la forma en las que se realizan las tareas, en donde predomina el esfuerzo muscular dinámico.

## Agradecimientos

Este proyecto fue desarrollado gracias al financiamiento recibido por parte de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se agradece la colaboración de la Municipalidad de Cartago, especialmente al señor Guillermo Rodríguez Hernández quien brindó todo el apoyo logístico durante la ejecución del mismo y a los trabajadores de los locales participantes.

## Referencias

- [1] A. Luttmann, M. Jager y B. Griefahn, Prevención de trastornos musculoesqueléticos en el lugar de trabajo, Berlín: Organización Mundial de la Salud, 2004.
- [2] C. Ferraro, Apoyando a las PYMES: Políticas de fomento en América Latina y el Caribe., Santiago: Naciones Unidas, 2011.
- [3] L. Arenas Ortiz y O. Cantú Gómez, «Factores de riesgo de trastornos músculo-esqueléticos crónicos laborales,» *Medicina Interna de México*, vol. 29, n° 4, pp. 370-379, 2013.
- [4] Y. Chen, J. Mc Donald y N. Cherry, «Incidence and suspected cause of work-related musculoskeletal disorders, United Kingdom, 1996-2001,» *Occupational Medicine*, vol. 56, n° 6, pp. 406-413, 2006.
- [5] E. Agila Palacios, C. Colunga Rodríguez, E. González Muñoz y D. Delgado García, «Síntomas musculoesqueléticos en trabajadores operativos del área de mantenimiento de una empresa petrolera ecuatoriana,» *Ciencia & Trabajo*, vol. 51, pp. 198-205, 2014.
- [6] V. Córdova, R. Pinto y B. Chavéz, «Córdova, V., Pinto, R., LLambías, J., & Chavéz, B. (2009). Capacidad de manejo manual de carga de trabajadores Chilenos: pesos máximos aceptables para tareas de levantamiento,» *Ciencia & Trabajo*, vol. 34, pp. 204-210, 2009.
- [7] A. Creus Solé y J. Mangosio, Seguridad e Higiene en el Trabajo, Buenos Aires: Alfaomega, 2011.
- [8] P. Buckle y J. Devereux, «The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders.,» *Applied ergonomics*, vol. 33, n° 3, pp. 207-217, 2002.

- [9] R. Rosario Amézquita y T. Améz, «Prevalencia de trastornos músculo-esqueléticos en el personal de esterilización,» *Medicina y seguridad del trabajo*, pp. 24-43, 2014.
- [10] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, «Estadísticas de Salud Ocupacional Costa Rica 2015,» Consejo de Salud Ocupacional, San José, 2015.
- [11] S. Konz, *Diseño de sistemas de trabajo*. México: LIMUSA S.A., México: LIMUSA S.A, 1990.
- [12] V. Mathiowetz , N. Kashman, G. Volland, K. Weber, M. Dowe y S. Rogers, «Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults,» *Arch Phys Med Rehabil*, pp. 69-72, 1985.
- [13] AENOR, *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica (ISO 8996: 2004)*, Madrid: ISO, 2005.
- [14] Agencia Europea para la seguridad y salud en el trabajo, «Riesgos asociados a la manipulación manual de cargas en el lugar de trabajo,» 2007.
- [15] J. Pérez Bilbao y C. Nogareda Cuixart, *NTP 367: Envejecimiento y trabajo: la gestión de la edad.*, Madrid: INSHT. 1992.
- [16] J. F. Ramírez Villada, C. E. Melo y R. G. Laverde, «Análisis de la relación entre la potencia, la capacidad anaeróbica y la velocidad desplazamiento en varones entre 50 y 60 años de edad,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.archivosdemedicina.com/medicina-de-familia/anlisis-de-la-relacin-entre-la-potencia-la-capacidad-anaerbica-y-la-velocidad-desplazamiento-en-varones-entre-50-y-60-aos-de-edad.pdf>. [Último acceso: 28 Junio 20017].
- [17] M. López Alonso, M. Martínez Aires y E. Martín González, «Análisis de los riesgos musculoesqueléticos asociados a los trabajos de ferrallas. Buenas prácticas.» 2011.
- [18] Universidad de Málaga, *Manipulación manual de cargas: Factores de riesgo que están presentes y forma de prevenir los riesgos asociados.*, Servicio de Prevención de Riesgos Laborales (Sepruma)., 2007.
- [19] A. Caicedo G, J. Manzano , D. Gómez-Vélez y L. Gómez, «Factores de Riesgo, Evaluación, Control y prevención en el Levantamiento y Transporte Manual de Cargas,» *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, pp. 5-9, 2015.
- [20] Poder Ejecutivo, *Reglamento a la Ley de Igualdad de oportunidades para personas con discapacidad*. san José: La Gaceta., San José: La Gaceta, 1998.
- [21] Ministerio de Trabajo, *Reglamento General de Seguridad e Higiene del Trabajo*, San José: La Gaceta, 1970.
- [22] S. Nogareda Cuixart y M. Canosa Bravo, «NTP 477: Levantamiento manual de cargas: ecuación del NIOSH,» INSHT, Madrid, 1998.
- [23] L. Vigil, R. Gutiérrez, W. Cáceres, H. Collantes y J. Beas, «Salud ocupacional en el trabajo de estiba: los trabajadores de mercados mayoristas de Huancayo, 2006.,» *Revista Peruana de medicina experimental y salud pública.*, pp. 336-342, 2007.
- [24] S. Nogareda Cuixart y M. Canosa Bravo , *NTP 477: Levantamiento manual de cargas: ecuación del NIOSH*, Madrid: INSHT, 1998.
- [25] D. González Maestre, «Ergonomía y Psicosociología,» Fundación Confemetal., Madrid. 2008.
- [26] Egarsat, «Manipulación manual de cargas,» Ministerio de empleo y seguridad social., Madrid, 2015.
- [27] L. Muñoz Jashimoto, E. Vega Bustillos, F. Lopez Millan, B. Ortiz Navar y K. Duarte, «Fuerza máxima de agarre con mano dominante y no dominante. Hermosillo,» Hermosillo, 2009.
- [28] P. Mondelo, E. Torada, S. Comas Úriz, E. Castejón Vilella y E. Bartolomé Lacambra, «Ergonomía 2. Confort y estrés térmico. México: Alfaomega.,» Alfaomega, México, 2008.
- [29] J. Cortés Díaz, *Seguridad e Higiene del trabajo*, Madrid: TÉBAR, 2012.
- [30] INTECO, *Guía para la identificación de los peligros y la evaluación de los riesgos de salud y seguridad ocupacional.*, San José, 2011.
- [31] Organización Mundial de la Salud, «Índice UV. Solar Mundial. Guía práctica,» OMS, 2003.
- [32] C. Young, «Solar ultraviolet radiation and skin cancer,» *Occupational Medicine*, pp. 82-88, 2009.
- [33] A. M. Siani, G. R. Casale, A. Colosimo, C. A. Lang y M. G. Kimlin, «Occupational exposure to solar ultraviolet radiation of vineyard workers in Tuscany (Italy),» *Photochemistry and Photobiology*, pp. 925-934, 2011.
- [34] E. F. Bustamante, «El uso adecuado de protectores solares en Costa Rica,» *Revista Costarricense de Ciencias Médicas*, 1999.

- [35] K. Heinrich Bettoni, R. Pacheco Cubero, M. Solera Flores y M. Alfaro Hernandez, «Series de brillo solar en Costa Rica,» Ministerio de Ambiente, Energía, San José, 2013.
- [36] L. Vigil, R. Gutiérrez, W. Cáceres, H. Collantes y J. Beas, «Salud ocupacional en el trabajo de estiba: los trabajadores de mercados mayoristas de Huancayo 2006,» *Revista Peruana de medicina experimental y salud pública*, pp. 336-342, 2007.

# Determinación de la actividad biocida de extractos vegetales para el combate de la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Hemíptera: Aleyrodidae)

## Determination of the biocidal activity of plant extracts against the whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae)

Lucía Rodríguez-Montero<sup>1</sup>, Alexander Berrocal-Jiménez<sup>2</sup>,  
Roel Campos-Rodríguez<sup>3</sup>, Mairon Madriz-Martínez<sup>4</sup>

Rodríguez-Montero, L; Berrocal-Jiménez, A; Campos-Rodríguez, R; Madriz-Martínez, M. Determinación de la actividad biocida de extractos vegetales para el combate de la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Hemíptera: Aleyrodidae). *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Pág 117-129.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4373>

- 1 Estudiante de maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: lucia.rodriguezmontero@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0001-7866-2862>
- 2 Doctor en Ciencias Forestales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: aberrocal@tec.ac.cr  
 <https://orcid.org/0000-0003-2041-4772>
- 3 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Coordinador del Área Académica Agroforestal, Escuela de Agronegocios, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr  
 <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>
- 4 M.Sc. en Agricultura Ecológica. Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: maironpz@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0003-0247-2370>



## Palabras clave

*Bemisia tabaci*; *Ruta graveolens*; extracto vegetal.

## Resumen

La mosca blanca (*Bemisia tabaci* Genn.) es una especie plaga de importancia económica, ampliamente distribuida en el mundo y causante de pérdidas cuantiosas en la producción agrícola. Su combate suele basarse en aplicaciones repetitivas de insecticidas químicos, que producen contaminación ambiental y generan resistencia en las poblaciones de los insectos. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la actividad insecticida de nueve extractos vegetales en adultos de *B. tabaci*, bajo condiciones experimentales *in vitro*. Se realizaron bioensayos de toxicidad con los extractos etanólicos de cada planta a una concentración de 5000 mg/L, para determinar el de mejor desempeño. Las especies vegetales utilizadas fueron *Enterolobium cyclocarpum* (hojas y corteza), *Lippia graveolens* (hojas), *Ruta graveolens* (hojas), *Adonidia merrillii* (hojas y frutos), *Annona muricata* (semillas), *Curcuma longa* (raíz) y *Zingiber officinale* (raíz). El más tóxico fue el extracto de *R. graveolens*, el cual se fraccionó por cromatografía de columna con tres solventes de polaridad creciente: isopropanol: diclorometano (8:2), etanol 96% y agua. Finalmente se realizaron bioensayos con las tres particiones fitoquímicas para determinar su actividad y lograr una aproximación al tipo de compuestos responsables de la actividad tóxica. La fracción menos polar (isopropanol: diclorometano [8:2]) fue la que ocasionó la mayor mortalidad. La investigación buscó generar información para el desarrollo de métodos de combate alternativos contra la plaga en estudio, teniendo como presupuesto que los extractos vegetales son una opción promisoriosa para el desarrollo de bioinsecticidas más seguros para el medio ambiente y la salud humana.

## Keywords

*Bemisia tabaci*; *Ruta graveolens*; plant extract.

## Abstract

The whitefly *Bemisia tabaci* Genn. is a pest. It causes economic losses in crop production and it is distributed worldwide. The combat against it is usually based on repetitive applications of chemical pesticides, resulting in environmental contamination and genetic resistance of insect populations. This research was carried out with the objective of evaluating the insecticidal activity of nine plant extracts in adults of *B. tabaci*, under *in vitro* experimental conditions. Toxicity bioassays with the ethanolic extracts of each plant at a concentration of 5000 mg/L were tested to determine the one with the best performance. The plant species used were *Enterolobium cyclocarpum* (leaves and bark), *Lippia graveolens* (leaves), *Ruta graveolens* (leaves), *Adonidia merrillii* (leaves and fruits), *Annona muricata* (seeds), *Curcuma longa* (root) and *Zingiber officinale* (root). The most toxic extract was *R. graveolens*; it was fractionated by column chromatography with three solvents of increasing polarity: isopropanol: dichloromethane (8:2), ethanol 96% and water. Finally, bioassays were carried out with the three phytochemical partitions to determine their activity and to approximate to the type of compounds responsible for the toxic activity. The least polar fraction (isopropanol: dichloromethane [8:2]) was the one that caused the highest mortality. The research sought to provide a basis for the creation of alternative control methods against the pest in study, under the assumption that plant extracts are a promising option for the development of bio-insecticides safer for the environment and human health.

## Introducción

La mosca blanca (*Bemisia tabaci*, Gennadius; hemíptera: Aleyrodidae) es una de las especies plaga más ampliamente distribuidas en regiones tropicales y subtropicales del mundo. Se adapta mejor a regiones costeras y con altitudes inferiores a los 1000 m.s.n.m, aunque también se ha observado en ambientes por encima de esa altura, principalmente la del biotipo B. De esta manera, *B. tabaci* se ha convertido en una de las plagas agrícolas más dañinas en todo el mundo en los últimos 20 años [1], [2] pues ha ocasionado pérdidas económicas que se estiman en cientos o incluso miles de millones de dólares al año [3]. En los lugares en que está presente, afecta a numerosas especies, comúnmente a plantas pertenecientes a las familias Cruciferae, Cucurbitaceae, Solanaceae y Leguminosae, entre otras.

Este hemíptero es dañino por su directa alimentación del floema, lo cual debilita a la planta, también por sus excreciones, que sirven de fuente nutricional para el desarrollo de hongos que interfieren con la cantidad de radiación solar que llega a las hojas [4]. Aún así, el daño más severo lo causa como vector de un gran número de virus del género *begomovirus* (Geminiviridae), los cuales son responsables de enfermedades arrasadoras, que pueden acabar hasta con el 100% de las cosechas [5], [6].

La aplicación de insecticidas sintéticos como los cloronicotínicos, los piretroides y los organofosforados es la práctica más utilizada en Costa Rica y el mundo para el combate de la mosca blanca y en ocasiones se hace de manera irracional, lo que incrementa los costos de producción y en la mayoría de los casos, no logra un combate eficiente de la especie en condición de plaga [7], [8]. Se ha comprobado que el uso convencional de insecticidas es poco o nada funcional en el control de *B. tabaci* [9], pues su plasticidad genética y la brevedad de su ciclo de vida le confieren a esta especie gran capacidad de adaptación y a su vez, le permiten desarrollar rápidamente altos niveles de resistencia [10].

Frente a esta situación, se hace necesario reducir la cantidad de productos químicos aplicados a los cultivos e integrar métodos alternativos que permitan un buen control de la plaga y aminoren los impactos ambientales [11].

Los extractos botánicos representan una opción promisoría como fuente de productos naturales bioactivos, más seguros y de bajo costo. Las plantas producen metabolitos secundarios para protegerse del ataque de otros organismos; estos compuestos pueden ser utilizados por su potencial insecticida o repelente [12]. Para la realización del presente proyecto se hizo una búsqueda bibliográfica previa de especies que han sido reportadas en la literatura con actividad insecticida (cuadro 1).

Las hojas y la corteza de *E. cyclocarpum* han presentado actividad biocida; en ellas se encuentran saponinas, glucósidos cianogénicos, taninos y triterpenos, entre otros [23]. *C. longa* y *Z. officinale* se utilizan de manera empírica como insecticidas caseros, y algunos estudios han comprobado esta actividad, la cual se puede atribuir a flavonoides, cumarinas, taninos, sesquiterpenos y monoterpenos, entre otros compuestos presentes en sus rizomas [24], [25], [26], [27].

Balqis *et al.* [28] demostraron el potencial tóxico de frutos de *V. merrillii*, atribuido a alcaloides, taninos, flavonoides, triterpenos y saponinas. Asimismo, ocurre con *L. graveolens*, y *R. graveolens*, que han sido reportadas con efecto insecticida debida a terpenos, flavonoides, taninos, cumarinas y otras moléculas con actividad biológica [20], [29], [5], [30], [31]. Finalmente, las semillas de *A. muricata* han demostrado su actividad insecticida contra dípteros, hemípteros, blatodeos y coleópteros; principalmente se asocia esta con las acetogeninas [32], [33], [34].

**Cuadro 1.** Efectividad tóxica y concentración requerida de productos de plantas, en insectos.

Familia	Especie de planta	Insecto	Parte de la planta	Concentración	Efecto	Referencia
Annonaceae	<i>Annona squamosa</i>	<i>Bemisia argentifolii</i>	Semillas	0,25%	98,3% mortalidad	[13]
	<i>Annona muricata</i>	<i>Plutella xylostella</i>	Hojas	5 mg/mL	100% mortalidad	[14]
		<i>Sitophilus zeamaiz</i>	Semillas	0,40%	95,6% mortalidad	[15]
	<i>Annona mucosa</i>	<i>Helicoverpa armigera</i>	Semillas	2000 ppm	100% mortalidad	[16]
Zingiberaceae	<i>Curcuma longa</i>	<i>Crocidolomia pavonana</i>	Raíz	116,73 µg/mL (LC50)	85% mortalidad	[17]
		<i>Bactrocera zonata</i>	Raíz	1000 ppm	85% mortalidad	[18]
	<i>Zingiber officinale</i>	<i>Musca domestica</i>	Raíz	1000 ppm	100% mortalidad	[19]
Rutaceae	<i>Ruta graveolens</i>	<i>Bemisia tabaci</i>	Hojas	750 ppm	99,1% mortalidad	[5]
Verbenaceae	<i>Lippia graveolens</i>	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Hojas	100 ppm	86% mortalidad	[20]
Arecaceae	<i>Cocos nucifera</i>	<i>Sitophilus oryzae/ Callosobruchus chinensis</i>	Hojas	10 mg/100 cc	100% mortalidad	[21]
Fabaceae	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	<i>Aedes aegypti</i>	Semillas	2,39 mg/mL (LC50)	100% mortalidad	[22]

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la actividad insecticida de los nueve extractos etanólicos vegetales mencionados sobre adultos de *Bemisia tabaci*, mediante bioensayos *in vitro*.

## Metodología

### Obtención del material vegetal y extractos etanólicos

El material vegetal se recolectó de distintas partes del país (cuadro 2), siguiendo la normativa establecida por la Comisión Nacional para la Gestión de la Biodiversidad (CONAGEBIO) con respecto a la investigación y uso de los recursos de la biodiversidad.

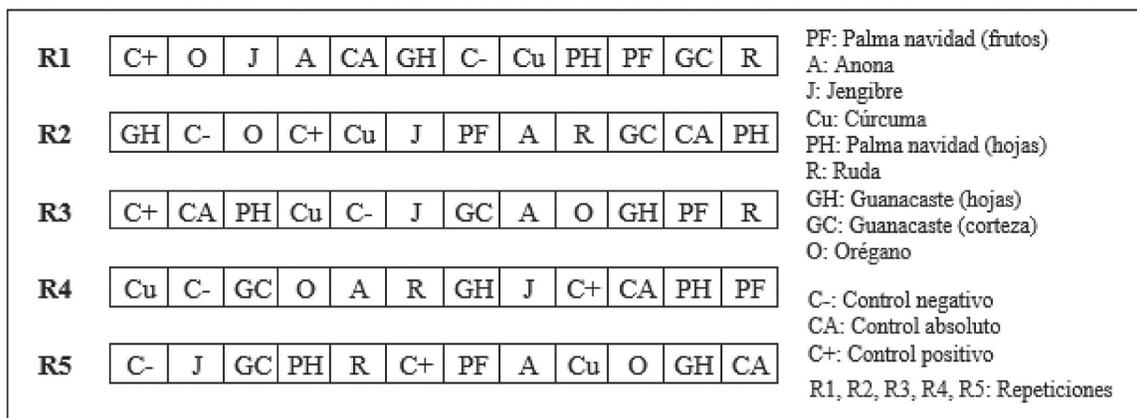
El material se limpió y se secó en un horno a 50 °C durante 3 días. Una vez seco se molió para obtener partículas finas que se sometieron a extracción con etanol. Por cada 100 g de material seco se adicionaron 700 ml de etanol al 96 %. A este material se le hicieron dos extracciones seguidas, con etanol fresco. La primera extracción se realizó aplicando sonicación durante 30 min y la segunda, aplicando sonicación 30 min y dejándola en reposo por aproximadamente 18 h. El extracto obtenido de las dos extracciones se filtró al vacío en un embudo Büchner acoplado a un matraz de Kitasato; luego se concentró en un rotavapor a 40 °C y a presión reducida. Una vez concentrado el extracto, este se liofilizó y de cada muestra, se preparó una solución de 5000 mg/L en una mezcla de etanol al 96 % y agua (1:1), para la realización de los bioensayos. Esta concentración fue elegida de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada de las especies vegetales.

**Cuadro 2.** Caracterización de especies utilizadas para realizar los extractos etanólicos

Nombre común	Especie	Estructura de uso	Etapas de desarrollo	Coordenadas del sitio	Altitud (msnm)	Fecha de colecta
Palma navidad	<i>A. merrillii</i>	Frutos	Fructificación	9.9203461, -84.5020629	260	08/06/2018
Anona	<i>A. muricata</i>	Semillas	Fructificación	9.9203461, -84.5020629	260	02/06/2018
Jengibre	<i>Z. officinale</i>	Raíz	Desarrollo vegetativo	10.0416002, -84.1686986	1200	27/06/2018
Cúrcuma	<i>C. longa</i>	Raíz	Desarrollo vegetativo	10.0416002, -84.1686986	1200	27/06/2018
Palma navidad	<i>A. merrillii</i>	Hojas	Fructificación	9.9203461, -84.5020629	260	27/06/2018
Ruda	<i>R. graveolens</i>	Hojas y flores	Floración	10.0322340, -84.3973757	950	30/06/2018
Guanacaste	<i>E. cyclocarpum</i>	Hojas	Desarrollo vegetativo	10.0322340, -84.3973757	950	30/06/2018
Guanacaste	<i>E. cyclocarpum</i>	Corteza	Desarrollo vegetativo	10.0322340, -84.3973757	950	30/06/2018
Orégano	<i>L. graveolens</i>	Hojas	Desarrollo vegetativo	10.0322340, -84.3973757	950	02/07/2018

### Bioensayos con extractos etanólicos

Los bioensayos fueron realizados con adultos de *B. tabaci*, para lo cual se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con nueve tratamientos y tres controles (figura 1), cada uno de ellos con cinco repeticiones.



**Figura 1.** Distribución del bioensayo

Para evaluar los efectos de los extractos en adultos de *B. tabaci*, se siguió la metodología establecida por Baldin *et al.* [11] con previas modificaciones. La unidad experimental consistió en un recipiente plástico de 1 L con un respiradero tapado con malla antiáfidos, al cual se introdujo una plántula de tomate (*Solanum lycopersicum*) de aproximadamente 20 días de

germinada, previamente asperjada con 3 ml del tratamiento correspondiente. Cada recipiente se inoculó con 20 insectos introducidos a través de dos orificios, en los que se acopló un aspirador de insectos. Estos recipientes se mantuvieron en condiciones de invernadero con un fotoperiodo típico (figura 2).



**Figura 2.** Unidad experimental

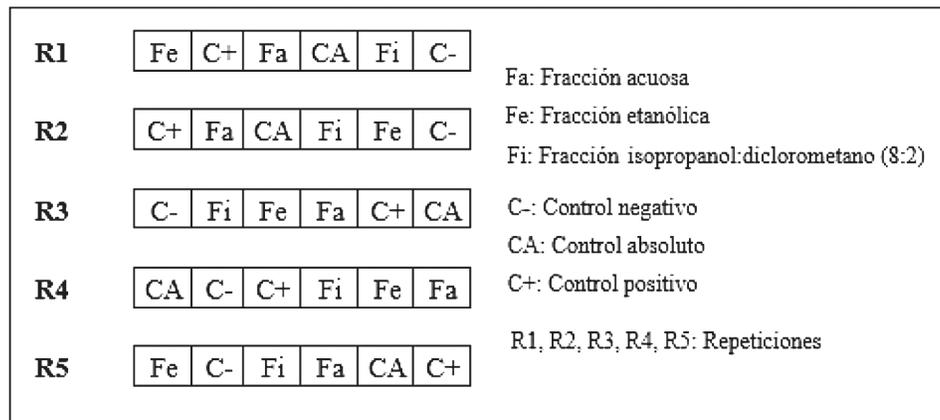
Se utilizaron un control positivo con imidacloprid como compuesto activo (Premise 20 SC), un control negativo con el vehículo de aplicación (etanol 96 % + agua, 1:1) y un control absoluto en que no se rociaron las plantas. El conteo de insectos muertos se realizó a las 24, 48 y 72 h, y se aceptó una mortalidad no mayor al 10 % en el control negativo. Con el propósito de eliminar la mortalidad de los insectos por causas ajenas al tratamiento, se determinó la mortalidad corregida (MC) según la fórmula de Abbott (ecuación 1) [35]. También se realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias de Tukey ( $P = 0,05$ ), utilizando el programa estadístico Design Expert®, para evaluar diferencias significativas entre tratamientos.

$$MC = \frac{\%mortalidad\ tratamiento - \%mortalidad\ control\ negativo}{100 - \%mortalidad\ control\ negativo} \quad (\text{ecuación 1})$$

### Fraccionamiento del mejor extracto y bioensayo

Con el fin de hacer una aproximación al tipo de compuesto responsable de la actividad biocida, el extracto con mejor desempeño (*R. graveolens*) se fraccionó con solventes de polaridad creciente (isopropanol: diclorometano [8:2], etanol 96% y agua), en una columna de cromatografía. Primero se elaboró una cabeza de fracción mezclando 304 mg de extracto crudo con 1,5 g de resina Diaion® HP-20SS, que se diluyeron en una mezcla de etanol y agua (3:1); esta mezcla se llevó a sequedad en un concentrador SpeedVac. Se hicieron pasar 50 ml de cada solvente por la columna con ayuda de una bomba de succión. Cada fracción se colectó en balones; este procedimiento se realizó por duplicado de manera simultánea.

Cada fracción se llevó a sequedad en un rotavapor y se liofilizó. De cada una de ellas, se prepararon concentraciones de 5000 mg/L con las que se realizó un bioensayo de toxicidad con adultos de *B. tabaci*, empleando cinco repeticiones. El bioensayo se dispuso en bloques completos al azar (figura 3), manteniendo los mismos controles y monitoreando la temperatura y la humedad relativa.



**Figura 3.** Disposición del bioensayo con fracciones fitoquímicas de *R. graveolens*

## Resultados y discusión

### Obtención de extractos etanólicos vegetales

El rendimiento cuantitativo y cualitativo de la extracción, en gran medida se debe al solvente utilizado, pero no se cuenta con un método ni un solvente definidos, pues estos dependerán de la naturaleza de los compuestos por extraer, así como de factores tales como la naturaleza de la muestra, la concentración del solvente, la temperatura, el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la relación masa-solvente, entre otros [36].

En este trabajo se utilizó etanol debido a que es el solvente por excelencia en las extracciones vegetales por su bajo costo, baja toxicidad y eficiencia de extracción [37].

La extracción realizada fue asistida por sonicación, cuyos efectos mecánicos ocasionan la ruptura de las paredes celulares, facilitando la liberación de los componentes de la célula; también, inducen una mayor penetración del solvente en dichas células, aumentando los rendimientos de extracción, lo que a su vez reduce la necesidad de altas temperaturas operativas, permitiendo así la extracción de compuestos termolábiles [38].

Una vez obtenidos todos los extractos etanólicos de las plantas en estudio, se determinó la masa de los extractos liofilizados así como su porcentaje de rendimiento, tomando como referencia la masa seca inicial del material utilizado de cada especie vegetal (cuadro 3).

El porcentaje de rendimiento más bajo lo presentó la corteza de *E. cyclocarpum*, con tan solo un 0,25%. Tomando en cuenta que el disolvente utilizado fue etanol, se puede considerar que en la corteza de esta especie se encuentran una menor cantidad de metabolitos secundarios con polaridades altas.

Por otra parte, el porcentaje de rendimiento de extracción más alto lo presentó *A. muricata* (semillas) con un 5,95%. Las semillas son órganos de reserva en donde se da acumulación

de metabolitos secundarios [39]. Algunos autores han reportado buenos rendimientos de extracción a partir de semillas con etanol [40], [41] que superan los obtenidos por medio de métodos tradicionales como el prensado o el que utiliza hexano.

**Cuadro 3.** Rendimiento de extracción (%) de los extractos etanólicos de las plantas estudiadas

Material vegetal	Masa seca inicial (g)	Masa del extracto etanólico liofilizado (g)	Rendimiento de extracción (%)
<i>A. merrillii</i> (frutos)	200	9,4	4,70
<i>A. muricata</i> (semillas)	200	11,9	5,95
<i>Z. officinale</i> (raíz)	125	7,1	5,68
<i>C. longa</i> (raíz)	123	6,4	5,20
<i>A. merrillii</i> (hojas)	200	9	4,50
<i>R. graveolens</i> (hojas y flores)	200	8,6	4,30
<i>E. cyclocarpum</i> (hojas)	200	5,7	2,85
<i>E. cyclocarpum</i> (corteza)	600	1,5	0,25
<i>L. graveolens</i> (hojas)	200	7,8	3,90

En general, los rendimientos de extracción obtenidos en los nueve casos no fueron satisfactorios si se comparan con los obtenidos en otros estudios en que se utilizó etanol. Se recomienda que, para estudios posteriores, se considere incluir dentro del protocolo de extracción la agitación constante, el incremento de temperatura e, incluso, un pulverizado más fino de las muestras para aumentar el área de contacto.

#### Efecto de los extractos etanólicos en adultos de *B. tabaci*

Con respecto a las condiciones del invernadero de experimentación durante el tiempo en que transcurrió el bioensayo, la temperatura osciló entre 15,9 °C y 31,1 °C y la humedad relativa entre 26,1% y 60,7%. Estos dos factores abióticos influyeron en la dinámica poblacional y el desarrollo de *B. tabaci*. En el desarrollo de esta especie, se ha encontrado que 26 °C es la temperatura óptima para el crecimiento de la población, ya que muy baja (< 17 °C) o muy alta (> 32 °C), se retrasa el desarrollo [42]. Con respecto a la humedad relativa, se conoce que las poblaciones se desarrollan mejor cuando es alta (>60%), a menos de ese valor, se reduce la ovoposición. No obstante, el rango en que osciló este parámetro permite la supervivencia del insecto [1].

En todos los tratamientos, incluidos los controles, se observó un aumento en la mortalidad conforme aumentaban las horas de exposición. Asimismo, en presencia tanto del control negativo como del absoluto la mortalidad fue menor del 10% al término de las 72 h, lo cual da validez a los datos que dio el bioensayo (cuadro 4).

El control positivo (imidacloprid) fue el que mostró más actividad tóxica, pues se alcanzó un 82,2% de mortalidad al término de las 72 h.

A pesar de su eficiencia y su uso intensivo actual, existen registros sobre resistencia al imidacloprid en *B. tabaci*, observados por primera vez en 1996, en invernaderos en la región de Almería, en el sur de España. Otros estudios demostraron que las poblaciones de *B. tabaci*,

en las áreas de cultivo de algodón de Arizona, se volvieron ligeramente menos susceptibles al imidacloprid, de 1995 a 1997 [43], [44]. Es por esto que el imidacloprid actualmente está en riesgo de ineffectividad por resistencia, debido principalmente a la sobredosificación y a la alta frecuencia de aplicación [9], [45].

**Cuadro 4.** Mortalidad media (%) ( $\pm$ DS) de adultos de *B. tabaci* en plántulas de tomate rociadas con extractos etanólicos, en los diferentes periodos de evaluación (n=5)

Tratamiento	% promedio de mortalidad $\pm$ DS* (5000 mg/L)		
	24 h	48 h	72 h
<i>A. merrillii</i> (frutos)	4,0 $\pm$ 0,84	9,0 $\pm$ 1,30	15,9 $\pm$ 0,84
<i>A. muricata</i>	4,0 $\pm$ 1,14	7,0 $\pm$ 1,52	11,9 $\pm$ 1,14
<i>Z. officinale</i>	3,0 $\pm$ 0,84	4,0 $\pm$ 0,84	6,0 $\pm$ 0,84
<i>C. longa</i>	4,0 $\pm$ 1,52	8,0 $\pm$ 1,52	11,9 $\pm$ 1,52
<i>A. merrillii</i> (hojas)	5,0 $\pm$ 0,84	9,9 $\pm$ 0,71	13,9 $\pm$ 0,84
<i>R. graveolens</i>	6,0 $\pm$ 0,84	23,8 $\pm$ 0,84	35,7 $\pm$ 1,30
<i>E. cyclocarpum</i> (hojas)	7,0 $\pm$ 1,14	10,9 $\pm$ 1,30	12,9 $\pm$ 1,14
<i>E. cyclocarpum</i> (corteza)	3,0 $\pm$ 0,84	4,0 $\pm$ 0,84	6,0 $\pm$ 0,84
<i>L. graveolens</i>	3,0 $\pm$ 0,55	4,0 $\pm$ 0,84	8,0 $\pm$ 0,55
Control absoluto	2,0 $\pm$ 0,89	3,0 $\pm$ 0,55	7,0 $\pm$ 0,89
Control negativo	3,0 $\pm$ 1,14	5,0 $\pm$ 1,00	7,0 $\pm$ 1,14
Control positivo	35,7 $\pm$ 1,30	54,5 $\pm$ 0,71	82,2 $\pm$ 1,34

\* Desviación estándar

Ningún extracto etanólico ocasionó más de 16% de mortalidad media a las 72 h, a excepción del extracto de *R. graveolens*, el cual en promedio ocasionó la muerte de un 35,7 % de los insectos en ese periodo. La prueba del análisis de la varianza y comparación múltiple de medias de Tukey mostró diferencias significativas entre este extracto y todos los demás tratamientos. Esto sugiere que el extracto etanólico de ruda posee algún grado de actividad tóxica, aunque no tan efectiva como el insecticida imidacloprid.

Algunos autores han reportado altos niveles de toxicidad de extractos de ruda en mosca blanca. Romero *et al.* [5] evaluaron un extracto etanólico de *R. graveolens* en adultos de *B. tabaci*, utilizando hojas de calabacín y obtuvieron un 99,1 % de mortalidad a las 72 h. Por otro lado, un extracto hidroalcohólico de ruda recolectada en Colombia evidenció actividad insecticida (43,81 %) sobre *Trialeurodes vaporariorum* al ser aplicado por inmersión [30].

La baja mortalidad alcanzada con ruda y los demás extractos en comparación con los estudios citados (cuadro 1) puede obedecer a varias causas. El material de origen vegetal presentó variabilidad en el tipo y la concentración de sus compuestos debido a factores como la época del año, la ubicación geográfica, el tipo de suelo, la edad del material y el estado fenológico, entre otros.

La observación anterior se complementa con el hecho de que se ha encontrado que existen variaciones circadianas de los metabolitos secundarios presentes en las plantas. Duarte *et al.* [46] observaron que las hojas de *Lippia alba* contienen más carvona (terpenoide) en horas de la noche. Por ende, queda claro que una complicación difícil de paliar en el proceso de investigación de extractos vegetales para el desarrollo de insecticidas es la heterogeneidad

propia de los materiales de origen natural. Debido a esto, se hace necesario generar información de la composición de metabolitos secundarios de las plantas y su relación con las condiciones del entorno en el cual se encuentran. Al generarse información de estas variaciones, se podría llegar a estandarizar el uso del material vegetal e incluso, a evaluar condiciones de estrés a las cuales este puede ser sometido para incrementar la producción de cierto tipo de metabolitos.

### Obtención de fracciones y evaluación en bioensayos

Los resultados de los bioensayos sobre la actividad insecticida de los extractos etanólicos vegetales no fueron satisfactorios, tomando en cuenta que la concentración usada fue alta (5000 mg/L) y que la mortalidad máxima obtenida con el extracto crudo fue de tan solo 35,7%. A pesar de ello, se decidió fraccionar el extracto y evaluar la actividad tóxica de cada fracción. Luego de la obtención de las tres fracciones del extracto etanólico, se calculó el rendimiento de extracción de cada una, que dio como resultado un rendimiento total del 94 %.

Al evaluar los efectos de cada una de las particiones fitoquímicas en bioensayos, nuevamente el imidacloprid fue el que causó mayor mortalidad en adultos de *B. tabaci*, un 84,2 % a las 72 h. Además, tanto en el control negativo como en el absoluto la mortalidad no superó el 10 %, situación que valida los resultados obtenidos (cuadro 5).

De las particiones fitoquímicas evaluadas, la fracción isopropanol:diclorometano (Fi) causó la actividad tóxica más marcada, con un 38,7 % de mortalidad a las 72 h. Además, fue la que se acercó más a la tendencia mostrada por el extracto crudo, lo cual sugiere que los compuestos presentes en ella podrían ser los principales causantes de dicha actividad. Por su parte, la fracción acuosa (Fa) ocasionó tan solo un 17,9 % de mortalidad a las 72 h, debido a su concentración de componentes hidrofílicos de mayor polaridad, como los azúcares o los derivados azucarados como las saponinas [8].

En el caso de la fracción etanólica (Fe), al término de las 72 h hubo un 27,8 % de mortalidad, pero se comenzaron a ver síntomas de fitotoxicidad (enrollamiento, necrosis en las puntas de hojas y deshidratación del tejido foliar) en la plántula de tomate; a pesar de esto, la mortalidad en este tratamiento fue baja. Barboza *et al.* [47] también reportaron fitotoxicidad en hojas de cedro, por la partición del diclorometano de un extracto metanólico de *R. graveolens* al 0,0092 % m/v.

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que los principales compuestos responsables de la actividad insecticida en adultos de *B. tabaci* son de baja polaridad, debido a que la fracción menos polar fue la más activa. Esto coincide con lo reportado por Cárdenas, Lugo y Roza [48], quienes evaluaron las concentraciones letales al 50% (CL50) y 90% (CL90), las cuales indican la concentración a la cual se espera que una sustancia produzca la muerte del 50% o 90% de los individuos, respectivamente. Los autores compararon la CL50 y CL90 obtenidas con extractos de ruda sobre larvas de mosquitos y sugieren que los solventes no polares concentran mejor las sustancias larvicidas contenidas en *R. graveolens*.

En vista de que la mosca blanca *B. tabaci* tiene un historial de generación de resistencia a los insecticidas utilizados para su combate [45], se recomienda recurrir al uso de la mayor cantidad de medidas no químicas, por lo que enfocar los controles en el manejo integrado de plagas haciendo uso de la fracción de *R. graveolens* obtenida en esta investigación (Fi) podría resultar una herramienta eficaz para mantener bajos niveles poblacionales de la plaga.

Un factor importante que considerar en la búsqueda de métodos alternativos para este fin es que además de ser eficaces para combatir las plagas, deben ser ambientalmente benignos y rentables económicamente. Una concentración efectiva muy alta, implicaría una alta demanda de materia prima para obtener el producto, aspecto de gran importancia, pues una de las barreras en el desarrollo de los plaguicidas botánicos ha sido el uso sostenible de la materia prima [5].

**Cuadro 5.** Mortalidad media (%) ( $\pm DS$ ) de adultos de *B. tabaci* en plántulas de tomate rociadas con las fracciones del extracto crudo, en los diferentes periodos de evaluación

Tratamiento	% promedio de mortalidad $\pm DS^{**}$ (5000 mg/L)		
	24 h	48 h	72 h
Fa*	4,0 $\pm$ 0,84	12,9 $\pm$ 0,55	17,9 $\pm$ 0,55
Fe*	8,9 $\pm$ 0,84	18,9 $\pm$ 0,45	26,8 $\pm$ 0,89
Fi*	20,8 $\pm$ 0,84	29,8 $\pm$ 0,71	38,7 $\pm$ 0,84
Control absoluto	2,0 $\pm$ 0,55	4,0 $\pm$ 0,84	8,0 $\pm$ 1,14
Control negativo	2,0 $\pm$ 0,55	6,0 $\pm$ 0,84	9,0 $\pm$ 1,10
Control positivo	39,6 $\pm$ 1,22	60,4 $\pm$ 1,79	84,2 $\pm$ 1,00

\*Fa: acuosa; Fe: etanólica; Fi: isopropanol: diclorometano (8:2)

\*\*Desviación estándar

Luego de haber obtenido tan solo un 38,7 % de mortalidad con la Fi, se consideró que no era viable realizar el cálculo de la CL50. En lugar de ello, se sugieren estudios posteriores que involucren extracciones del follaje de ruda con diferentes solventes y fraccionamientos más finos, que permitan una mejor aproximación a los compuestos activos contra *B. tabaci*.

## Conclusiones

Los rendimientos cuantitativos de la extracción etanólica llevada a cabo fueron del 0,25 % al 5,95 %. Los extractos etanólicos de las especies vegetales evaluadas mostraron baja actividad insecticida en los adultos de *B. tabaci* a la concentración de 5000 mg/L. El extracto etanólico de *R. graveolens* fue el más activo contra adultos de *B. tabaci*, ya que ocasionó un 35,7 % de mortalidad al término de las 72 h.-

Aunque aún son necesarios estudios adicionales para el aislamiento de sustancias y la estandarización del uso del material vegetal, los hallazgos presentados demuestran la existencia de un potencial en *R. graveolens* para ser usado como insecticida natural contra la mosca blanca.

Las tres particiones fitoquímicas del extracto crudo de *R. graveolens* mostraron actividad insecticida en el orden del 17,9 al 38,7 % en los adultos de *B. tabaci*, a la concentración de 5000 mg/L. Al término de las 72 h, la fracción etanólica comenzó a generar fitotoxicidad en las plántulas de tomate. Los hallazgos sugieren que la fracción menos polar (isopropanol: diclorometano [8:2]) es la que concentra los principales compuestos activos contra adultos de *B. tabaci*, por lo que se sugieren estudios posteriores que se centren en la búsqueda de compuestos de baja polaridad, de esta especie.

## Referencias

- [1] F.J. Morales, C. Cardona, J.M. Bueno e I. Rodríguez, "Manejo integrado de enfermedades de plantas causadas por virus transmitidos por moscas blancas", CIAT, Cali, Colombia, 2006.
- [2] S.S. Zaidi, R.W. Briddon, and S. Mansoor, "Engineering dual begomovirus *Bemisia tabaci* resistance in plants," *Trends Plant Sci.*, 22(1), pp. 6-8, 2017.
- [3] L. Hilje and G. Mora, "Promissory botanical repellents/deterrents for managing two key tropical insect pests, the whitefly *Bemisia tabaci* and the mahogany shootborer *Hypsipyla grandella*," in *Naturally Occurring Bioactive Compounds*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006, pp. 379-403.



- [4] E. Cerna Chávez, *et al.*, "Variación en la susceptibilidad a insecticidas de *Bemisia tabaci* biotipo B alimentada sobre diferentes hospederos", *Phyton (Buenos Aires)*, 85(2), pp. 256-261, 2016.
- [5] R. Romero *et al.*, "Actividad insecticida de seis extractos etanólicos de plantas sobre mosca blanca", *Rev. Protección Veg.*, 30, pp. 11-16, 2015.
- [6] P. Segovia *et al.*, "Efecto de extractos vegetales en mosca blanca bajo dos esquemas de aplicación", *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(1), pp. 1-7, 2015.
- [7] C.E. Ail Catzim *et al.*, "Insecticidal and repellent effect of extracts of *Pluchea sericea* (Nutt.) on adults of *Bemisia tabaci* (Genn.)", *Revista Chapingo (Serie Horticultura)*, 21(1), pp. 33-41, 2015.
- [8] E. Cruz, "Efecto de extractos vegetales en el control de mosca blanca (*Bemisia tabaci* Genn.) bajo condiciones de laboratorio", tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México, 2009.
- [9] L. Araya, E. Carazo y V. Cartín, "Diagnóstico del uso de insecticidas utilizados contra *Bemisia tabaci* (Gennadius) en tomate y chile en Costa Rica", *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica)*, 75, pp. 68-76, 2005.
- [10] L. Hilje, "Avances hacia el manejo sostenible del complejo mosca blanca-geminivirus en tomate, en Costa Rica", *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*, 61, pp. 69-80, 2001.
- [11] E.L.L. Baldin *et al.*, "Botanical extr acts: alternative control for silverleaf whitefly management in tomato", *Hortic. Bras.*, 33(1), pp. 59-65, 2015.
- [12] A. Celis *et al.*, "Extractos vegetales utilizados como biocontroladores con énfasis en la familia Piperaceae", *Agronomía Colombiana* 26(1), pp. 97-106, 2008.
- [13] L. Chien-Yih *et al.*, "Control of silverleaf whitefly, cotton aphid and kanzawa spider mite with oil and extracts from seeds of sugar apple," *Neotropical Entomology*, 38(4), pp. 531-536, 2009.
- [14] R.C. Prêdes *et al.*, "Actividad larvica y variación estacional del extracto de *Annona muricata* en *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)", *Revista Colombiana de Entomología*, 37(2), pp. 223, 2011.
- [15] A.D. Asmanizar and A.B. Idris, "Evaluation of *Jatropha curcas* and *Annona muricata* seed crude extracts against *Sitophilus zeamais* infesting stored rice," *Journal of Entomology*, 9(1), pp. 13-22, 2012.
- [16] C.M. Souza *et al.*, "Lethal and growth inhibitory activities of Neotropical Annonaceae-derived extracts, commercial formulation, and an isolated acetogenin against *Helicoverpa armigera*," *J. Pest Sci.*, 90, pp. 701-709, 2017.
- [17] A.M.V. Javier, V.R. Ocampo, F.A. Ceballo and P.A. Javier, "Insecticidal activity of crude ethanolic extracts of five Philippine plants against cabbage worm, *Crociodolomia pavonana* Fabricius (Lepidoptera: Crambidae)," *Philippine Journal of Science*, 147(3), pp. 513-521, 2018.
- [18] A.R. Siddiqi *et al.*, "Effects of *Curcuma longa* extracts on mortality and fecundity of *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae)", *Ciênc. Agrotec.: Lavras*, 35(6), pp. 1110-1114, 2011.
- [19] C. Chioma and F. Ifeomah, "The efficacy of *Zingiber officinale* (Ginger-Zingiberaceae) crude extracts applied as individual and mixed with *Dennettia tripetala* (Pepperfruit-Annonaceae) against *Musca domestica* (housefly) larvae," *Journal of Experimental Agriculture International*, 17(5), pp. 1-9, 2017.
- [20] P. Guevara *et al.*, "Biocidal effect of a hexane-soluble extract of *Lippia graveolens* Kunth (Verbenaceae)," *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 17(4), pp. 342-349, 2018.
- [21] P.U. Rani, T. Venkateshwaramma, and P. Devanand, "Bioactivities of *Cocos nucifera* L. (Arecaceae) and *Terminalia catappa* L. (Myrtales: Combretaceae) leaf extracts as post-harvest grain protectants against four major stored product pests", *J. Pest Sci.*, 84, pp. 235-247, 2011.
- [22] D.F. Farias *et al.*, "Water extracts of Brazilian leguminous seeds as rich sources of larvicidal compounds against *Aedes aegypti* L.," *An Acad. Bras. Cienc.*, 82(3), pp. 585-594, 2010.
- [23] M.M. Martínez *et al.*, "*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.: The biotechnological profile of a tropical tree," *Bol. Latinoam. Caribe Plant. Med. Arom.*, 11(5), pp. 385-399, 2012.
- [24] R.A. Freire-González y M. Vistel-Vigo, "Caracterización fitoquímica de la *Curcuma longa* L.", *Rev. Cub. Quím.*, 27(1), pp. 9-18, 2015.
- [25] M. Leyva *et al.*, "Actividad insecticida de aceites esenciales de plantas en larvas de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)", *Rev Cubana Med Trop*, 60(1), pp. 78-82, 2008.
- [26] U. Malik, I.A. Sadiq, U. Mani, H. Badamasi y I.A. Ahmed, "Evaluation of ginger (*Zingiber Officinale* Roscoe) rhizome extract against whitefly (*Bemisia Tabaci* Genn.) on tomato (*Lycopersicon Lycopersicum* L.)", *The Journal of Applied Sciences Research.*, 2(2), pp. 93-96, 2015.
- [27] W. Zhang, H.J. McAuslane y D.J. Schuster, "Repellency of Ginger Oil to *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on Tomato", *Journal of Economic Entomology*, 97(4), pp. 1310-1318, 2004.

- [28] U. Balqis *et al.*, "Cuticular surface damage of *Ascaridia galli* adult worms treated with *Veitchia merrillii* betel nuts extract in vitro", *Vet World*, 10(7), pp. 732-737, 2017.
- [29] M.L. Peschiutta *et al.*, "Effectiveness of Mexican oregano essential oil from the Dominican Republic (*Lippia graveolens*) against maize pests (*Sitophilus zeamais* and *Fusarium verticillioides*)", *Agriscientia*, 33(2), pp. 89-97, 2016.
- [30] C. Salazar, C.A. Betancourth y T. Bacca, "Evaluación de extractos vegetales sobre mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) en frijol en condiciones de laboratorio", *Revista de Ciencias Agrícolas*, 20(1), pp. 50-61, 2003.
- [31] F. Silva *et al.*, "Insecticide effects of *Ruta graveolens*, *Copaifera langsdorffii* and *Chenopodium ambrosioides* against pests and natural enemies in commercial tomato plantation", *Acta Scientiarum: Agronomy*, 33(1), pp. 37-43, 2011.
- [32] C.A. Hincapié, D. Lopera y M. Ceballos, "Actividad insecticida de extractos de semilla de *Annona muricata* (Anonaceae) sobre *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae)", *Rev. Colomb. Entomol.*, 34(1), pp. 76-82, 2008.
- [33] L.C. Paz *et al.*, "Toxicity of the organic extract from *Annona muricata* L. (Annonaceae) seeds on *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae) in cabbage cultivation (*Brassica oleracea* L.)", *Ciência Agrícola: Rio Largo*, 16(1), pp. 55-60, 2018.
- [34] P.C. Robledo-Reyes, R. González, G.I. Jaramillo y J. Restrepo, "Evaluación de la toxicidad de acetogeninas anonáceas sobre ninfas de *Periplaneta americana* L. (Dictyoptera: Blattidae)", *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*, 9(1), pp. 54-61, 2008.
- [35] W.S. Abbott, "A method of computing the effectiveness of an insecticide", *J. Econ. Entomol.*, 18(2), pp. 265-267, 1925.
- [36] M. Soto García y M. Rosales Castro, "Efecto del solvente y de la relación masa/solvente sobre la extracción de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de extractos de corteza de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*", *Cienc. Tecnol.: Maderas*, 18(4), pp. 701-714, 2016.
- [37] Y. Sánchez, "Fitoquímica de cinco especies del género *Baccharis* (*B. boyacensis* Cuatr., *B. lehmannii* Klatt, *B. macrantha* Kunth, *B. bogotensis* Kunth, *B. mutisiana* Cuatrec) endémicas del altiplano cundiboyacense", tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2010.
- [38] L. Wang and C.L. Weller, "Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants", *Trends in Food Science & Technology*, 17, pp. 300-312, 2006.
- [39] R. González *et al.*, "Efecto insecticida de extractos vegetales sobre larvas de *Culex tarsalis* (Diptera: Culicidae) en laboratorio", *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 4(2), pp. 273-284, 2013.
- [40] C.O. Brossard González *et al.*, "Evaluación preliminar del etanol anhidro como solvente en la extracción de aceite de semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)", *Grasas y Aceites*, 61(3), pp. 295-302, 2010.
- [41] O.D. López *et al.*, "Lipid extraction from seeds of *Cucurbita pepo* L. (pumpkin)", *Rev. Cub. Plant. Med.*, 14(2), 2009 [en línea]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1028-7962009000200005&script=sci\\_arttext&lng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1028-7962009000200005&script=sci_arttext&lng=en)
- [42] Q. Bao-li *et al.*, "Effect of temperature on the development and reproduction of *Bemisia tabaci* B biotype (Homoptera: Aleyrodidae)", *Entomologia Sinica*, 10(1), pp. 43-49, 2003.
- [43] F.J. Byrne *et al.*, "Biochemical study of resistance to imidacloprid in B biotype *Bemisia tabaci* from Guatemala", *Pest Management Science*, 59, pp. 347-352, 2003.
- [44] A. Elbert and R. Nauen, "Resistance of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) to insecticides in southern Spain with special reference to neonicotinoids", *Pest Management Science*, 56, pp. 60-64, 2000.
- [45] E.V. Cruces, "Los neonicotinoides y su uso seguro en la agricultura", tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2016.
- [46] S. Duarte *et al.*, "Estudio de la variación circadiana de los metabolitos secundarios volátiles obtenidos por destilación-extracción con solvente simultánea de hojas de *Lippia alba* (fam. Verbenaceae)", *Scientia et Technica*, 18(33), pp. 83-85, 2007.
- [47] J. Barboza *et al.*, "Fagodisuasión de un extracto de ruda (*Ruta chalepensis*, Rutaceae) y sus particiones sobre larvas de *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae)", *Rev. Biol. Trop.*, 58(1), pp. 1-14, 2010.
- [48] E. Cárdenas, L. Lugo y A. Rozo, "Efecto tóxico del extracto acuoso de *Ruta graveolens* L. (Rutaceae) sobre larvas de *Anopheles albimanus* Wiedemann, 1820 y *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 (Diptera: Culicidae), en condiciones experimentales", *Entomotrópica*, 25(1), pp. 11-18, 2010.