

Vol. 15, Núm. 1 (2023)

# aci

**avances**  
en ciencias e  
ingenierías



# aci

**avances**  
en ciencias e  
ingenierías



## **ACI Avances en Ciencias e Ingenierías**

ISSN(e): 2528-7788  
ISSN (impreso): 1390-5384  
<http://avances.usfq.edu.ec/>  
Quito, Ecuador

15/05/2023

DOI: <https://doi.org/10.18272/aciv.1511>

**ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** es una revista científica con revisión por pares (*peer-reviewed*), de acceso abierto (*open access*), e indexada que publica trabajos en ciencias exactas, físicas, biológicas, ambientales, ingenierías, e investigaciones en el interfaz de estas disciplinas desarrollados por científicos de cualquier institución o país.

**ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** es publicada por USFQ PRESS, casa editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y es parte de las siguientes bases, catálogos e índices: MIAAR, Latindex y Latindex 2.0, Archive.org, ROAD, DOAJ, REDIB, Google Scholar, Crossref, SIS.

**Editora General:** Eva O.L. Lantsoght, Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y Delft University of Technology, Delft, Países Bajos

### **Editores asociados**

Daniela Almeida Streitwieser<sup>1,3</sup>  
Elisa Bonaccorso<sup>2</sup>  
Diego F. Cisneros-Heredia<sup>2</sup>  
Oihane Fernández Blanco<sup>4</sup>  
Melissa Infusino<sup>1</sup>  
René Parra Narváez<sup>1</sup>  
Diana Alexandra Pazmiño<sup>2</sup>  
Esteban Suárez<sup>1</sup>  
Lionel Trojman<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

<sup>2</sup> COCIBA, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

<sup>3</sup> Reutlingen University, Alemania

<sup>4</sup> Investigadora independiente

<sup>5</sup> Institut supérieur d'électronique de Paris, Francia

### **Consejo editorial**

Andrea Arias, DuPont Pioneer, Johnston, IA, Estados Unidos  
Carlos Ventura, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canadá  
César Costa, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Ecuador  
César Iván Álvarez-Mendoza, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador  
Janio Jardán, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador  
Johannio Marulanda Casas, Universidad del Valle, Cali, Colombia  
John Blake, University of Florida, Gainesville, FL, Estados Unidos  
Luis Rincón, Universidad de Los Andes, Mérida, República Bolivariana de Venezuela  
Nikolay Aguirre, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador  
Nora Oleas, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador  
Oswaldo Morales Nápoles, Delft University of Technology, Países Bajos  
Robert Cazar, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador  
Ruth Mariela Alvarez, Universidad de Carabobo, República Bolivariana de Venezuela  
Salvador Godoy, Instituto Politécnico Nacional, México, México D.F.  
Santiago Ron, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador  
Yenisel Plasencia-Calaña, Maastricht University, Países Bajos

### **International Scientific Committee**

Paula Rojas, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile  
Gabriela Guevara, Universidad Técnica de Berlín, Germany  
Patricia Conde Cespedes, ISEP - École d'ingénieurs du numérique, France  
Tiziano Perea, Universidad Autónoma Metropolitana, México  
Howard Ramirez-Malule, Universidad del Valle, Colombia  
Patrick Venail, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú  
Victor Murray, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú  
Julio Valdivia-Silva, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú  
Luca Sorriso-Valvo, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome, Italy

**Producción editorial:** USFQ PRESS

**Corrección de estilo y ortotipográfica:** Gabriel Ortiz Armas, Pablo Mendieta y Reema Azar

**Diseño general:** Krushenka Bayas Ramírez

**Diseño de cubierta:** Krushenka Bayas Ramírez

**Fotografía de cubierta:** Freepik

**Webmaster y manejo de OJS:** Jaime Páez, Gabriel Ortiz Armas

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etcétera, en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

La información presentada en esta revista es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la editorial, ni los editores, ni los autores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en esta obra ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

### **USFQ PRESS / ACI Avances en Ciencias e Ingenierías**

Att. Eva Lantsoght, editora

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Calle Diego de Robles y Pampite. Campus Cumbayá

Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico: [avances@usfq.edu.ec](mailto:avances@usfq.edu.ec) - [usfqpress@usfq.edu.ec](mailto:usfqpress@usfq.edu.ec)

## Contenido

Editorial

### **Scientific Research in Tumultuous Times**

Eva O.L. Lantsoght

#### **Sección A: Ciencias exactas y Físicas**

##### **Demonstrating the feasibility of testing microscopic acausality at the LHC with CMS open data**

Demostrando la viabilidad de estudiar la acausalidad microscópica en el LHC con datos abiertos de CMS

Jonathan Sanchez

##### **A Data Driven Solution to the Dark Matter Problem**

Bruce Hoeneisen

#### **Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales**

##### **Bioaccessibility as a tool for planning bioremediation of petroleum-polluted soil**

La bioaccesibilidad como herramienta de planificación de la biorremediación de suelos contaminados con petróleo

Daniel Hidalgo-Lasso, Karina García-Villacís, Juan López Montalvo, Patricia Yanez-Torres, Darwin Marín Tapia,

Jeaneth Urvina Ulloa, Paul Vargas-Jentzsch

##### **Bioeconomía de biocompuestos basados en residuos orgánicos domésticos para la disminución del impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito**

Bioeconomy of biocomposite based on domestic organic waste to reduce the environmental impact generated by disposable plastic waste in the Pasaje Amador Building in the city of Quito

Andrea Hernández, Marco Rojo

#### **Sección C: Ingenierías**

##### **Reacción al fuego de madera sólida de *Pinus pseudostrabus* y de tableros de madera enlistonados, contrachapados, de fibra de media densidad y de astillas orientadas: Estudio comparativo del tiempo de ignición y de la pérdida de masa**

Reaction to fire of solid wood of *Pinus pseudostrabus* and of slatted boards, plywood, medium-density fiberboards and oriented strand boards: Comparative study of ignition time and mass loss

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Israel Macedo Alquicira, Ernesto Mendoza González, Gerardo Gallegos León

##### **Diseño de una ruta de conversión de residuos lignocelulósicos para la producción de butano como sustituto del gas licuado de petróleo**

Design of a lignocellulosic waste conversion route for the production of butane as a substitute of liquefied petroleum gas

Devi Orozco, Ana Velastegui, Nicolas Vela-Garcia

##### **Simulation of ultimatum game with Artificial Intelligence and biases**

Simulación del juego del ultimátum con inteligencia artificial y sesgos

Julio C. Añasco Flores, Bryan J. Naranjo Navas, Pamela A. Proaño Mora, Maria A. Vasileuski Kramskova

#### **Proceso editorial**

## Scientific Research in Tumultuous Times

Eva O.L. Lantsoght<sup>1,2\*</sup>

Department of Engineering Structures, Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands

Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

\* Corresponding author: [elantsoght@usfq.edu.ec](mailto:elantsoght@usfq.edu.ec)

.....

This issue marks the 15<sup>th</sup> volume and my fifth year as editor-in-chief of the journal *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* dedicated to all disciplines of the exact sciences, biology, and engineering. The past few years have been marked by a global pandemic, social unrest and strikes, political instability, soaring crime rates, and various natural disasters, such as mudslides, landslides, earthquakes, and extreme floods. Why, one may ask, should I spend my time and efforts on the promotion of scientific contributions in Ecuador and abroad while all hands are needed outside the ivory tower to address the challenges of the times?

Contrary to what one may think, it is during tumultuous times such as these that the value of scientific research becomes even more evident. Scientific research has always been a key driver of progress, leading to the development of new technologies, innovations, and solutions to complex problems. In times of crisis, such as the ones we are currently experiencing, the value of scientific research becomes even more evident. In the face of natural disasters, scientific research can help us better understand the causes and effects of these events, develop early warning systems, and implement measures to minimize their impact. In the context of political instability and social unrest, scientific research can provide insights into the root causes of these issues and offer evidence-based solutions to address them.

The exact sciences have long been associated with technological advancement and the development of new innovations that have revolutionized the way we live our lives. This has been especially true in recent years, as advances in computing and data science have led to breakthroughs in fields such as artificial intelligence and quantum computing. Our readers may recall the successful dossier of CARLA 2020, highlighting contributions from the Latin America High Performance Computing Conference organized by CEDIA in virtual format in September 2020. The current advances in technology, which rely on the exact sciences and engineering, have an enormous potential for solving some of the most complex problems in society, from climate change to healthcare.

The contributions of the biological sciences in understanding the impact of climate change on ecosystems and species have been instrumental. Scientists are working on solutions for conservation in our unique natural environments, such as in the Galapagos and the Amazon. These efforts will aid in the restoration and preservation of these environments in regions that are crucial to our country. Additionally, environmental scientists have played a critical role in understanding the impact of climate change on natural disasters such as mudslides and landslides and have developed tools for



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /  
Received:  
13/04/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



mitigating their impact through the study of river behavior, hydrology, and geology. Hopefully, these solutions will become policy, so that we will not see people fall victim to preventable disasters anymore. Moreover, food scientists have been pivotal in the sustainable cultivation of crops like corn and wheat to ensure that the growing population has access to nutritious food while preserving the environment. Key contributions have been highlighted in the dossier related to the generation of technologies in the cultivation of corn in Ibero-America, which took place in 2022 and of which the articles were published during the same year in *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*. Through their collective efforts, the environmental and biological sciences, highlighted in section B of *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, play a key role in creating a more sustainable and resilient Ecuador.

The third major field of the sciences that is celebrated in *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* is the field of engineering. Engineering is closely tied to the development of new technologies and infrastructure. From the construction of buildings and bridges to the development of new transportation systems and energy sources, engineers play a crucial role in shaping the world we live in and providing hands-on solutions in times of climate crisis. In the context of Ecuador, which is facing a growing need for energy infrastructure development and road infrastructure maintenance, engineering research is particularly valuable.

Despite the challenges of the times, it is important that we continue to promote scientific research in Ecuador and abroad. This is not only because of the potential benefits that such research can bring, but also because science is an essential part of our cultural heritage. Scientific research has been central to human progress for centuries, and it will continue to be so in the years to come.

In conclusion, the value of scientific research in tumultuous times cannot be overstated. The exact sciences, environmental sciences and biology, and engineering all have the potential to provide essential solutions to the challenges facing society today, from climate change to resilient infrastructure. It is essential that we continue to support and promote scientific research in Ecuador and abroad. I would like to take this opportunity to thank all the authors, reviewers, and editors who have made this issue of *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* possible, as well as the staff at USFQ Press who have been indispensable in the daily operations of the journal, and I look forward to continuing to work with you in the years to come.

## Demonstrating the feasibility of testing microscopic acausality at the LHC with CMS open data

Jonathan Sanchez<sup>1\*</sup>

Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Posgrados, Maestría en física de altas energías, Quito, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-7302-5968>

\*Jonathan Joel Sánchez Jácome, email: [jjsanchezj@outlook.com](mailto:jjsanchezj@outlook.com)

## Demostrando la viabilidad de estudiar la acausalidad microscópica en el LHC con datos abiertos de CMS

### Abstract

In this work, we describe the feasibility to reconstruct and measure acausal vertices that could arise from Lee Wick standard model processes. Using open data from the CMS experiment, we identify measurable wrong displaced vertices associated to acausal-like decays predicted by the Lee Wick model. The signal considered is the pair production of Lee Wick electrons due to its favorable cross-section. We estimated that the Lee Wick electron mass is equal to 200 GeV, because it can satisfy detector resolution limitations. The final state consists of one electron and a pair of jets emerging from a wrong displaced vertex for each of the Lee Wick electrons. We detail the method used to reconstruct wrong displaced vertices with the given topology. We also define a new quantity, the parallelity ( $\kappa_{\parallel}$ ), to better distinguish wrong displaced vertices. We compare the histograms of parallelity between events of simulated backgrounds, experimental data from Run 1, and the signal. An asymmetry in the parallelity distribution suggests the capability of distinguishing acausal decays if ever present.

**Keywords:** Finite theories, Lee Wick standard model, causality violation, wrong displaced vertex, CMS Open Data, parallelity

### Resumen

Este trabajo describe la posibilidad de reconstruir y observar vértices acausales originados del modelo estándar de Lee Wick. Haciendo uso de la base de datos abiertos del experimento CMS fue posible identificar vértices erróneamente desplazados predichos por el modelo de Lee Wick. La señal considerada se origina de la producción de pares de electrones de Lee Wick gracias a su favorable sección eficaz. El estudio se realizó con una masa del electrón de Lee Wick igual a 200 GeV, ya que supera las limitantes de resolución del experimento. El estado final consiste en un electrón y un par de jets originados de cada uno de los electrones de Lee Wick. Se detalla el método utilizado para reconstruir vértices erróneamente desplazados con la topología mencionada. Además se define una nueva cantidad, la paralelidad ( $\kappa_{\parallel}$ ), para distinguir vértices erróneamente desplazados de mejor manera. Comparamos los histogramas de paralelidad entre eventos de backgrounds simulados, datos experimentales de la Corrida 1 y la señal. Una asimetría en la distribución de paralelidad sugiere la posibilidad de distinguir decaimientos acausales si existiesen.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
25/07/2022

Aceptado /  
Accepted:  
17/02/2023

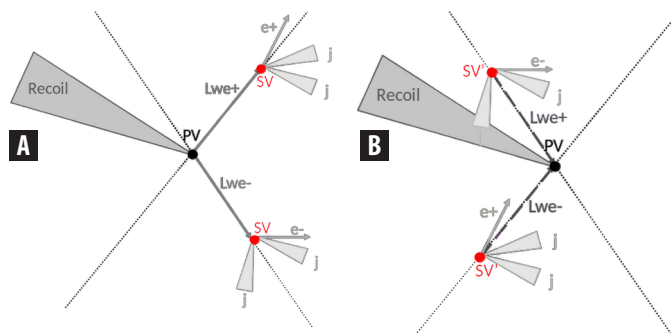
Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023

**Palabras clave:** Teorías finitas, modelo estándar de Lee Wick, violación de la causalidad, vértice erróneamente desplazado, Datos abiertos de CMS, paralelidad

It is usually hard to challenge ideas that serve as the foundation of physics. Causality, i.e., the notion that an effect is preceded by a cause, is a vivid example. State-of-the-art research machines, like the Large Hadron Collider (LHC) [1] at the CERN laboratory in Switzerland, offer a unique opportunity to test the notion of causality, not at the macroscopic level but at the microlevel in physics.

Known limitations of the Standard Model (SM) of particle physics [2] have encouraged physicists to formulate diverse extensions of this theory. One of those ideas, on which some of the least tested versions are based, is known as the Lee-Wick (LW) Standard Model (LWSM)[3]. It is founded on the finite theory of quantum electrodynamics model proposed by Lee and Wick [4]. Among other consequences, the model predicts an observable that could change the understanding of causality in the realm of fundamental interactions [5].

In the LWSM re-normalization process, each standard field is paired to an LW field. In the context of the by-products of high-energy hadronic collisions, those LW fields are associated to fast decaying, heavier particles, which could microscopically violate causality. In a causal resonant decay, after a particle is produced in the so-called primary vertex (PV), it travels a certain distance, to a secondary vertex (SV), before decaying into other particles (Figure 1.A). On the other hand, in the case of LW resonances, their final decay products appear at the same time (or before) the resonance was generated, as if the LW field would have propagated backwards in time [6]. These decays have a *wrong displaced vertex* (WDV) that can be distinguished because the total momentum of the final particles at the SV seems to point towards the collision spot [7], as depicted in Figure 1.B. For a macroscopic observer, the time differences between these two types of events are impossible to measure, yet they could be distinguished by observing their WDV topology.



**Figure 1: A.** Resonant decay as if LW-electrons ( $Lwe_{\pm}$ ) were produced in the primary vertex (PV) and causally decay at the secondary vertex (SV) into electrons ( $e_{\pm}$ ) and jets ( $j$ ); **B.** Acausal resonant decay as if LW-electrons ( $Lwe_{\pm}$ ) were produced in the PV and acausally decay at the wrong displaced secondary vertex ( $SV'$ ) into electrons ( $e_{\pm}$ ) and jets ( $j$ ).





Theoretical results suggest that it would be possible to test this acausal behaviour using collisions data from the LHC experiment. To the best of our knowledge, direct tests for these ideas have never been tried out. This is perhaps due to the small cross section of these processes and the large amounts of data needed. In this work, we used CMS open data to test the feasibility of carrying out these studies even if the volume of data is not yet sufficient to search for LW particles. These data were taken by the CMS experiment, one of the largest detectors at the LHC, during the so-called Run 1 period. Details about the CMS detector can be found elsewhere [8]. Among other characteristics, CMS had, at the time, a spatial resolution of about 0.02 mm for the determination of primary and secondary vertices. This feature imposed the main restriction to this investigation.

The best approach to overcome the experimental limitations is to study processes of LW-electrons ( $\ell^{e\pm}$ ) emerging from the Neutral Current (NC) sector of the LWSM [7],

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{NC} = & -Z_\mu [g_Z^{eL} (\bar{e}_L \gamma^\mu e_L - \bar{\tilde{\ell}}_{eL}^e \gamma^\mu \tilde{\ell}_{eL}^e) + g_Z^{eR} (\bar{e}_R \gamma^\mu e_R - \bar{\tilde{\ell}}_{eR}^e \gamma^\mu \tilde{\ell}_{eR}^e) \\ & + (g_Z^{eL} - g_Z^{eR}) \frac{m_e}{M_\ell} (\bar{e}_R \gamma^\mu \tilde{\ell}_{eR}^e - \bar{\tilde{\ell}}_{eR}^e \gamma^\mu e_R)], \end{aligned} \quad (1)$$

where the suffix  $R$  ( $L$ ) indicates the right-handiness (left-handiness) and  $g_Z^{eR,L}$  are the coupling constants between  $Z$  bosons and SM electrons. These particles, created in pairs, would later decay into a pair of SM electrons and  $Z$  bosons, namely,  $Z \rightarrow \ell^{e+} \ell^{e-} \rightarrow e^+ Z e^- Z$ .

Similar to reference [7], we calculated the Feynman rules and the average flight distances  $\lambda$  for this process with the Mathematica [9] package named FeynRules [10]. A summary of the values of  $\lambda$ , which are close to the minimum resolution of the CMS detector, are shown in Table 1 for different values of LW electron mass. The cross sections ( $\sigma$ ) for each mass value, which were calculated from simulated events in Madgraph 5 [11] for proton-proton collisions at 8 TeV, are shown in the same table. We used Pythia 8 [12] for the simulation of the showering and hadronization processes, after restricting the  $Z$ -boson decays to the hadronic channel ( $Z \rightarrow jj$ ). The final state is characterized by the presence of a pair of energetic electrons and 4 jets ( $j$ ) coming from a displaced vertex,  $\ell^{e+} \ell^{e-} \rightarrow e^+ e^- jjjj$ . Finally, the interaction of the decay products with the CMS sub-detectors was simulated using CMS software (CMSSW) [13] built-in tools [14]. Further descriptions are made with LW electron mass equal to 200 GeV, because of being the best candidate considering cross section and average flight distance.

**Table 1.** Calculated cross-section ( $\sigma$ ) and fly distance ( $\lambda$ ) for each mass value,  $M_\ell = 200, 300, 400, 500$  GeV.

$M_\ell$ (GeV)	$\sigma$ (fb $^{-1}$ )	$\lambda$ (mm)
200	5.97	2.70765e-02
300	0.96	1.64300e-02
400	0.23	1.21212e-02
500	0.06	9.65243e-03



Causally decaying vertices (Figure 1.A) only differ from WDV  $\text{events}$  (Figure 1.B) in the direction of the displacement vector from the PV to the SV  $\overrightarrow{PVSV}$ . A *parallelity* ( $\kappa_{\parallel}$ ) variable was defined, for the first time, as the scalar product between  $\overrightarrow{PVSV}$  and the total momentum of the decaying products,  $\vec{P}_{total}$ . This quantity was used as the discriminator between causal decays, with mostly  $\langle \kappa_{\parallel} \rangle > 0$ , and LW-decays, which tend to have values of  $\kappa_{\parallel} < 0$ . Because of conservation laws, we cannot simulate proper WDV decays, so we simulated our particles as causal decaying resonances. For this reason, we selected the opposite of  $\kappa_{\parallel}$  when the vertex comes from our signal.

To assess the feasibility of distinguishing events with displaced vertices, we look for candidate events with two jets and one energetic electron in the final state and study their  $\kappa_{\parallel}$  distribution. The two experimental datasets used ([15] and [16]) are characterized by the presence of events with at least two energetic photon- or electron-like (egamma) particles, corresponding to total integrated luminosity of 4.412 and 7.055 fb<sup>-1</sup>, respectively. To consider background processes that could give similar signatures, we use the following simulated datasets: Drell-Yang (DY) [17], top quark pair production (TTbar) [18], and W boson production in association with jets (WJets) [19, 20, 21], corresponding to cross-sections of 3503.7, 225.2 and  $1.75 \times 10^{-1}$  pb, respectively. The background, which originated from quantum chromodynamic (QCD) processes, was estimated from a region orthogonal to our signal. We fitted QCD to better match background and experimental data when the most energetic egamma particles have the same charge. The fitting was then extrapolated to the region that contains our signal.

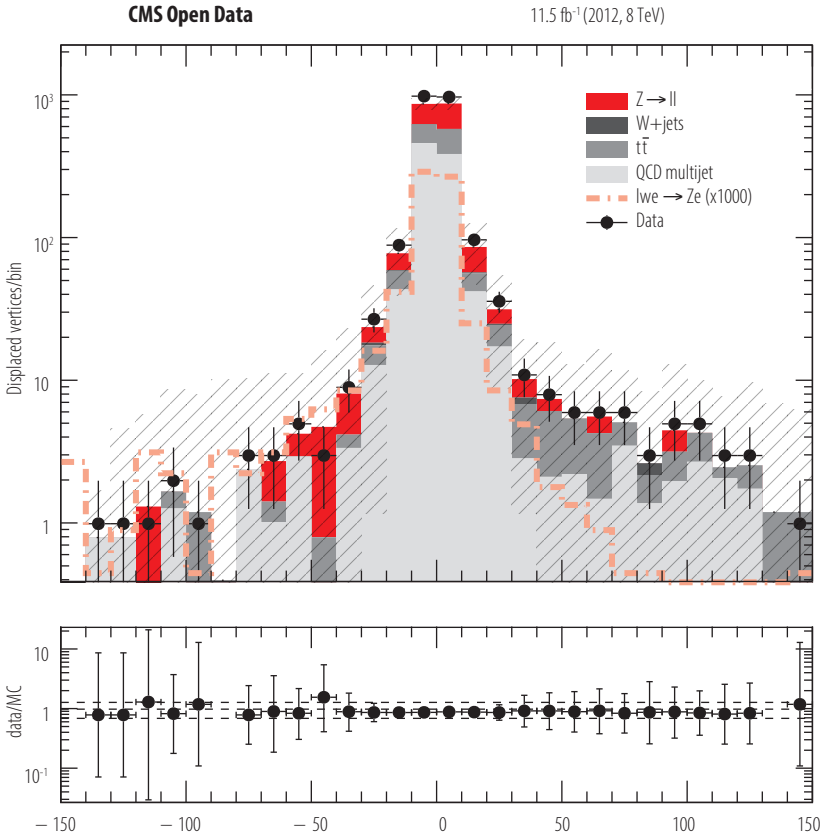
In a first stage for event selection, collisions were subject to pass a trigger that requires the presence of two highly isolated and mild shower-shaped egamma objects with transverse momentum over 36 GeV for the leading particle, and 22 GeV for the subleading one. Additionally, we require the egamma particles to be electrons and the presence of 4 jets with transverse momentum greater than 15 GeV. This selection requirement was named Trigger Filtering (TF). Details of the selection can be found in studies with SV reconstruction from leptons [22].

After the initial filtering, an Object Selection (OS) requirement was implemented. There, the electrons' minimum transverse momentum was tuned up to 40 GeV and 25 GeV. This guarantees a trigger efficiency of 99% [23]. Tracks associated to electrons are also required to match the high quality selection described in [22]. Additionally, at least 4 selected jets in the event must be from hadronic origin and have two or more constituents and a transverse momentum greater than 20 GeV. Details for this selection can be found in a previous study with SV reconstruction from hadronic jets [24]. Additionally, we required an electromagnetic jet energy fraction less than 0.6 to filter out mix of jets and electrons, more common in our topology than in others.

We also apply a Signal (SG) filter. We require that events must contain selected electrons of opposite charge. It is also required that the electron-jet structure follows this geometrical property: that the difference between the angular distance from the electron to the closest jet ( $\Delta R_1$ ) and the distance from the electron to the second closest jet ( $\Delta R_2$ ) be  $(\Delta R_2) \text{ be } |\Delta R_1 - \Delta R_2| < 0.2$ . Here,  $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$  is defined by the difference in the azimuthal angles ( $\phi$ ) and the pseudorapidities ( $\eta$ ) of the objects.



This spatial topology of electrons and jets was most commonly found in the acausal signal than in the background processes.



**Figure 2.** Parallelicity  $\kappa$ , for reconstructed displaced vertex from a pair of jets plus one electron is the scalar product between the total momentum of the objects at that vertex and the displacement vector of the SV. Background processes are shown in solid-colored histograms, while a signal example (blown up 1000 times) is drawn with a green dotted line. Black solid dots represent collisions data with the bars being their statistical uncertainty. Hashed regions represent the systematic uncertainties considered. An asymmetry between background processes and the signal is evident.

The SV were reconstructed using the combination of selected electrons and any pair of jets that happen to reconstruct and invariant mass between 80 and 160 GeV. The total amount of tracks resulting from this combination was then fed to an SV reconstruction algorithm (SVRA) described in [24]. The SVRA forces any possible pair of tracks to a vertex fitting algorithm. Only SV with an adequate fitting chi-squared normalized to the number of degrees of freedom ( $\chi_{norm}^2 < 5$ ) are selected. If any pair of SV share one or more tracks, the combined set of tracks is refitted to a new SV'. This process is repeated until none of the selected SV share tracks or there are no left well-fitted



vertices. Resulting  $SV'$  are then selected to guaranty they are well fitted, composed of at least 5 tracks, and follow other geometrical considerations as described in reference [24]. We also calculated the  $\kappa_{\parallel}$  value for each  $SV$  that contains the selected electrons. The comparative distributions for values of  $\kappa_{\parallel}$  are found in Figure 2. It is evident that, while SM model contributions (solid colors) show a rather symmetrical histogram, the signal histogram (in green dotted line) leans towards negative values of  $\kappa_{\parallel}$ .

For the final WDV selection criteria (WDVC), we require events to have at least one adequately-selected WDV: the WDV must be associated to one electron track; every  $SV$  associated to the same electron must have a separation transverse to the collision axis  $\overrightarrow{PVSV'} > 0.02$  mm; and the total transverse momentum  $\vec{P}_{total}^t > 20$  GeV.

Systematic uncertainties were estimated from the object and event selection comparable to the literature and can be visualized in Figure 2 as hashed bands. The uncertainty in the trigger efficiency was extracted from reference [23]. Uncertainties in electron energy and tracking alignment were inferred from [22]. Jet energy resolution and vertex reconstruction are comparable to reference [24], yet methods are not exactly the same, so we conservatively consider uncertainties of 3% and 18% respectively. Underlying events and integrated luminosity uncertainties are comparable to those found in reference [23]. A summary of the values can be found in Table 2.

**Table 2.** Systematic uncertainties for the selected objects that could mostly affect the value of parallelity calculation  $\kappa_{\parallel}$ .

Source	Uncertainty (%)
Vertex reconstruction	18
Jet energy resolution	3
Electron energy resolution	1
Underlying event	3
Tracker misalignment	2
Integrated Luminosity	3
Trigger efficiency	1

In conclusion, we have confirmed the feasibility of identifying WDV decays in events containing a pair of energetic electrons and 4 jets in CMS open data. Considering the upgrades that have taken place for the LHC experiments, including CMS, and the greater amounts of data that will be collected in upcoming years, we believe that the WDV method described in this study, together with a refined handling of systematic uncertainties, could be used to challenge microscopic causality and search for acausal signatures at the LHC.



## ACKNOWLEDGMENT

We gratefully acknowledge Edgar Carrera PhD. for his unsurpassable participation, guidance, and aid during this whole investigation. In the same way, we thank Santiago Paredes PhD for his technical assistance. We thankfully recognize the support from the University San Francisco de Quito and PoliGrants - HUBI Project 17462, for the financial assistance in this masteral program.

## CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no conflicts of interest to declare.

## REFERENCES

- [1] Evans, L., & Bryant, P. (2008). LHC machine. *Journal of Instrumentation*, 3(08), S08001–S08001. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08001>
- [2] Quigg, C. (2004). Nature's Greatest Puzzles. *eConf, C040802*, L001. arXiv: <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0502070>
- [3] Grinstein, B. [Benjamin], O'Connell, D., & Wise, M. B. (2008). The Lee-Wick standard model. *Phys. Rev. D*, 77, 025012. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.77.025012>. arXiv: <https://arxiv.org/abs/0704.1845> [hep-ph]
- [4] Lee, T. D., & Wick, G. C. (1970). Finite theory of quantum electrodynamics. *Phys. Rev. D*, 2, 1033–1048. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.2.1033>
- [5] Lee, T. D., & Wick, G. C. (1969). Negative Metric and the Unitarity of the S Matrix. *Nucl. Phys. B*, 9, 209–243. doi: [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(69\)90098-4](https://doi.org/10.1016/0550-3213(69)90098-4)
- [6] Grinstein, B. [Benjamin], O'Connell, D., & Wise, M. B. (2009). Causality as an emergent macroscopic phenomenon: The lee-wicko(n)model. *Physical Review D*, 79(10). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevd.79.105019>
- [7] Alvarez, E., Da Rold, L., Schat, C., & Szykman, A. (2009). Vertex Displacements for Acausal Particles: Testing the Lee-Wick Standard Model at the LHC. *JHEP*, 10, 023. doi: <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/10/023>. arXiv: <https://arxiv.org/abs/0908.2446> [hep-ph]
- [8] Chatrchyan, S. [S.] et al. (2008). The CMS Experiment at the CERN LHC. *JINST*, 3, S08004. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004>
- [9] Wolfram Research Inc. (n.d.). Mathematica, Version 12.3.1. Champaign, IL, 2021. Retrieved from <https://www.wolfram.com/mathematica>
- [10] Alloul, A., Christensen, N. D., Degrande, C., Duhr, C., & Fuks, B. (2014). Feynrules 2.0 — a complete toolbox for tree-level phenomenology. *Computer Physics Communications*, 185(8), 2250–2300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.04.012>
- [11] Alwall, J., Herquet, M., Maltoni, F., Mattelaer, O., & Stelzer, T. (2011). Madgraph 5: Going beyond. *Journal of High Energy Physics*, 2011(6). doi: [https://doi.org/10.1007/jhep06\(2011\)128](https://doi.org/10.1007/jhep06(2011)128)
- [12] Sjöstrand, T., Ask, S., Christiansen, J. R., Corke, R., Desai, N., Ilten, P., . . . Skands, P. Z. (2015). An introduction to pythia 8.2. *Computer Physics Communications*, 191, 159–177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024>
- [13] CMS-collaboration. (2016). CMS Software Version 5 3 X (CMSSW 5 3 X) (Version 2.3.X). doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.WYJG.FYK9>
- [14] Edgar Carrera, E. U., Cesar Montero. (n.d.). Examples for event generation with 2012 cmssw machinery. Available at <https://opendata.cern.ch/record/12052> (2022).
- [15] CMS-collaboration. (2017a). Doublephoton primary dataset in aod format from run of 2012. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.CEPG.EXLP>
- [16] CMS-collaboration. (2017b). Doublephoton primary dataset in aod format from run of 2012. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.KT69.ANB8>
- [17] CMS-collaboration. (2017c). Simulated dataset djjetstoll m-50 tunez2star 8tev-madgraph-tarball in aod- sim format for 2012 collision data. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.ARKO.6NV3>
- [18] CMS-collaboration. (2017d). Simulated dataset ttbar 8tev-madspin amcatnlo-herwig in aodsim format for 2012 collision data. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.XH95.JNSE>
- [19] CMS-collaboration. (2017e). Simulated dataset w1jetstolnu tunez2star 8tev-madgraph in aodsim format for 2012 collision data. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.REHM.JKUH>
- [20] CMS-collaboration. (2017f). Simulated dataset w2jetstolnu tunez2star 8tev-madgraph in aodsim format for 2012 collision data. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.DELK.2V7R>
- [21] CMS-collaboration. (2017g). Simulated dataset w3jetstolnu tunez2star 8tev-madgraph in aodsim format for 2012 collision data. *Open Data Portal*. doi: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.HHCJ.TVXH>



- [22] Chatrchyan, S. [Serguei] et al. (2013). Search in Leptonic Channels for Heavy Resonances Decaying to Long-Lived Neutral Particles. *JHEP*, 02, 085. doi: [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2013\)085](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2013)085). arXiv: <https://arxiv.org/abs/1211.2472> [hep-ex]
- [23] CMS-collaboration. (2012). Evidence for a new state decaying into two photons in the search for the standard model Higgs boson in pp collisions.
- [24] Khachatryan, V. et al. (2017). Search for R-parity violating supersymmetry with displaced vertices in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV. *Phys. Rev. D*, 95(1), 012009. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.012009>. arXiv: <https://arxiv.org/abs/1610.05133> [hep-ex]

# A Data Driven Solution to the Dark Matter Problem

Bruce Hoeneisen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [bhoeneisen@usfq.edu.ec](mailto:bhoeneisen@usfq.edu.ec)

## Abstract

A data driven solution to the dark matter problem is presented. This short and self-contained overview is intended for a wide audience, with full technical details available in the cited references. We present redundant, independent and consistent measurements of the dark matter particle comoving root-mean-square velocity  $v_{hrms}(1)$ , or equivalently, of the dark matter temperature-to-mass ratio. These measurements agree with the “no freeze-in and no freeze-out” scenario of spin zero dark matter that decouples early on from the Standard Model sector, e.g. spin zero dark matter coupled to the Higgs boson or to the top quark.<sup>1</sup>

**Keywords:** Warm Dark Matter, Galaxy Rotation Curves, Galaxy UV Luminosity, Dwarf Galaxies

## About this paper

The present article was published on April 13th, 2023 in the *European Journal of Applied Sciences* and it has been assigned a DOI by the EJAS. The work is republished by ACI *Avances en Ciencias e Ingenierías* according to the creative commons license (Attribution 4.0 International, CC BY 4.0) used by the EJAS, and according to the copyright preserved by the author, Bruce Hoeneisen. Readers can access the original publication via the following link: <https://journals.scholarpublishing.org/index.php/AIVP/article/view/14383> or through the DOI: <https://doi.org/10.14738/aivp.112.14383>.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



## INTRODUCTION

Most of the matter in the universe,  $84.3 \pm 0.2\%$  [1], is in a “dark matter” form that has been “observed” only through its gravitational interaction. As far as we know, this dark matter does not have any other interaction, at least down to the current sensitivity of our experiments and observations. Fritz Zwicky in 1933 found that the matter in the Coma cluster of galaxies greatly exceeds the mass in stars [2]. According to the book by Stefano Profumo [3], the mass  $m_h$  of dark matter particles is unknown over 90

<sup>1</sup> Presented at the 4th World Summit on Exploring the Dark Side of the Universe, La Reunion, November 7-11 2022

Recibido /  
Received:  
27/04/2023

Aceptado /  
Accepted:  
27/04/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023





orders of magnitude! In summary, we know exactly how much dark matter there is, but do not have the foggiest idea what it is.

This article presents an overview of a data driven solution to the dark matter problem.

## MEASUREMENTS

Let us assume that dark matter is a gas of particles that is ultra-relativistic in the early universe. As the universe expands, dark matter cools, and becomes non-relativistic. We expect that this non-relativistic gas is classical, i.e. has negative chemical potential [4] [5]. Let  $v_{hrms}(a)$  be the root-mean-square velocity of the non-relativistic dark matter particles.  $a(t)$  is the expansion parameter of the universe at time  $t$ , normalized to  $a(t_0) = 1$  at the present time.<sup>2</sup>  $v_{hrms}^2(a)$  is proportional to the dark matter temperature-to-mass ratio. As the universe expands, dark matter cools,  $v_{hrms}(a)$  varies in proportion to  $1/a$  [6], and the dark matter density  $\rho_h(a)$  varies in proportion to  $1/a^3$ , so

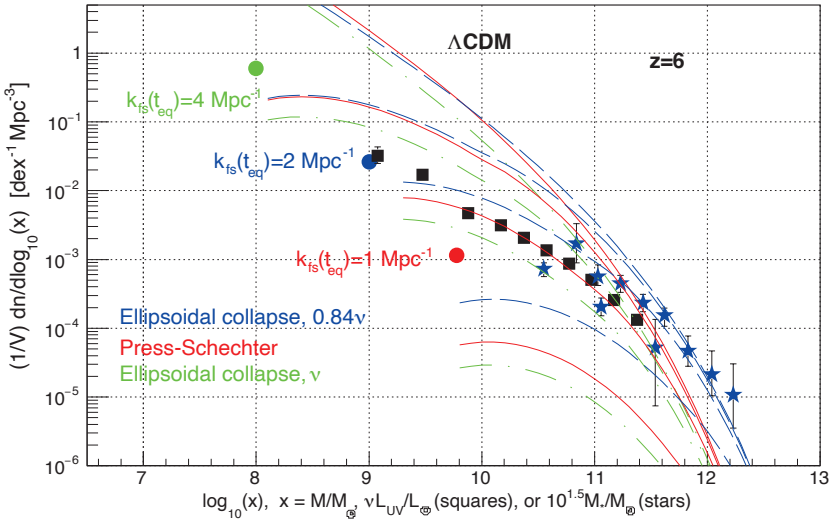
$$v_{hrms}(1) \equiv v_{hrms}(a)a = v_{hrms}(a) \left[ \frac{\rho_h(1)}{\rho_h(a)} \right]^{1/3} \quad (1)$$

does not depend on  $a$ . In other words, we say that  $v_{hrms}(1)$  is an “adiabatic invariant”.

It turns out that, to unravel the dark matter mystery, we need to measure the adiabatic invariant  $v_{hrms}(1)$ , and the related observable  $k_{fs} \equiv 2\pi/\lambda_{fs}$ , that we now explain. Due to the velocity dispersion  $v_{hrms}(a)$ , dark matter particles free-stream in and out of density minimums and maximums, erasing primordial density fluctuations of “comoving” wavelength less than approximately  $\lambda_{fs}$ [4] [7]. (Since wavelengths grow in proportion to  $a(t)$ , it is customary to refer the wavelength to the present time, i.e.  $a(t_0) = 1$ , hence the word “comoving.”)  $k_{fs}$  is the comoving cut-off wavenumber due to dark matter free-streaming. The theoretical relation between the two observables,  $v_{hrms}(1)$  and  $k_{fs}$ , is summarized in Table 1 [4] [7].

To measure  $k_{fs}$  we compare observed and predicted galaxy rest-frame ultra-violet luminosity distributions, and observed and predicted galaxy stellar mass distributions. An example, corresponding to “redshift”  $z = 6$ , or equivalently, expansion parameter  $a = 1/(1+z) = 1/7$ , is shown in Figure 1. Note that warm dark matter free-streaming attenuates small scale fluctuations and therefore reduces the numbers of galaxies with low mass. From this, and similar figures at redshifts  $z = 4, 8$  and  $10$ , we obtain  $k_{fs} = 2.0^{+0.8}_{-0.5} \text{ Mpc}^{-1}$  [17].

2 To understand the expansion parameter  $a(t)$ , imagine a balloon covered with dots. As the balloon is inflated, the distances between neighboring dots, i.e. galaxies, increase in proportion to  $a(t)$ .



**Figure 1.** Shown are distributions of  $x$ , where  $x$  is the observed galaxy stellar mass  $M_*/M_\odot$  times  $10^{15}$  (stars) [8] [9] [10], or the observed galaxy UV luminosity  $\nu L_{UV}/L_\odot$  (squares) [11] [12] [13] (corrected for dust extinction [14] [15]), or the predicted linear total (dark matter plus baryon) mass  $M/M_\odot$  (lines), at redshift  $z = 6$ . The symbol  $\odot$  means “sun”. The Press-Schechter prediction, and its Sheth-Tormen ellipsoidal collapse extensions, correspond, from top to bottom, to the warm dark matter free-streaming cut-off wavenumbers  $k_{fs} = 1000, 4, 2$  and  $1 \text{ Mpc}^{-1}$ . The round red, blue and green dots indicate the velocity dispersion cut-offs of the predictions [16] at  $k_{fs} = 1, 2$  and  $4 \text{ Mpc}^{-1}$ , respectively. Presenting three predictions illustrates the uncertainty of the predictions. Note that the data agree with predictions for  $k_{fs} \approx 2 \text{ Mpc}^{-1}$ .

**Table 1.** Calculated relation between the adiabatic invariant  $v_{hrms}(1)$ , and the comoving cut-off wavenumber  $k_{fs}$ , due to dark matter free-streaming [4] [7]. “Mega-parsec” (Mpc) is a unit of length used in cosmology.

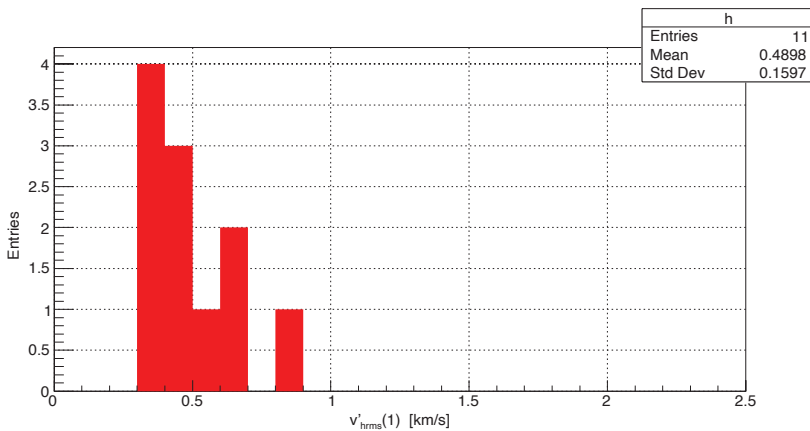
$v_{hrms}(1)$	$k_{fs}$
750 m/s	$1 \text{ Mpc}^{-1}$
490 m/s	$1.53 \text{ Mpc}^{-1}$
370 m/s	$2 \text{ Mpc}^{-1}$
190 m/s	$4 \text{ Mpc}^{-1}$
0.75 m/s	$1000 \text{ Mpc}^{-1}$

To measure the adiabatic invariant  $v_{hrms}(1)$  we note the following. Consider a free observer in a density peak in the early universe. This observer “sees” dark matter expand adiabatically, i.e. conserving  $v_{hrms}(1)$ , due to the expansion of the universe, reach maximum expansion, followed by adiabatic compression into the core of the galaxy due to gravitational attraction. The core of the galaxy forms adiabatically if dark matter is warm as we have assumed, i.e if  $v_{hrms}(1)$  is greater than zero [18]. Rotation and relaxation, due to galaxy collisions and mergers, increase the observed  $v'_{hrms}(1)$  above the true  $v_{hrms}(1)$  [6]. So, as long as rotation and relaxation remain negligible, we predict that the adiabatic



invariant in the core of the galaxy is the same as in the early universe, and so should be the same for all galaxies (with negligible rotation and relaxation). The adiabatic invariant in the core of a spiral galaxy can be obtained from the observed rotation curves of neutral atomic hydrogen gas or of stars, together with infrared and visible images [19]. The distribution of the adiabatic invariant measured in several dwarf galaxies is shown in Figure 2. We obtain a narrow peak with  $v_{hrms}(1) = 406 \pm 69$  m/s [6]. The few galaxies with  $v'_{hrms}(1)$  to the right of this peak have significant rotation and/or relaxation.

We note, from Table 1, that the measurements of  $k_{fs}$  and  $v_{hrms}(1)$  are consistent with each other. We conclude that, 1)  $v_{hrms}(1)$  in the core of galaxies (corrected for dark matter rotation and relaxation) is of cosmological origin, as inferred from the narrowness of the peak in Figure 2, and as predicted for warm dark matter [18] [21]; and 2) that  $k_{fs}$  is indeed due to warm dark matter particle free-streaming. Additional observables studied, that obtain consistent results, are the redshift of first galaxies [16], the ultra-violet luminosity of first galaxies [17], and the related “reionization optical depth” [17]. For a summary of measurements see [17].



**Figure 2.** Distribution of  $v'_{hrms}(1)$ , i.e. the adiabatic invariant before the dark matter rotation and relaxation correction, of 11 dwarf galaxies. These corrections can only be negative, and so are negligible in the peak at  $v'_{hrms}(1) \approx v_{hrms}(1) \approx 0.4$  km/s. Data from [20].

These measurements obtain the dark matter temperature-to-mass ratio, not separately the temperature or mass. At this point we have already learned something: dark matter models that predict  $v_{hrms}(1)$  in disagreement with these measurements can be ruled out (if the measurements are correct). In particular, cold dark matter candidates, such as “WIMPS” and “axions”, are disfavored. Let us mention that the entire analysis is data driven, with full details, and the sources of all data and measurements, available in the references.

## COLD AND WARM DARK MATTER

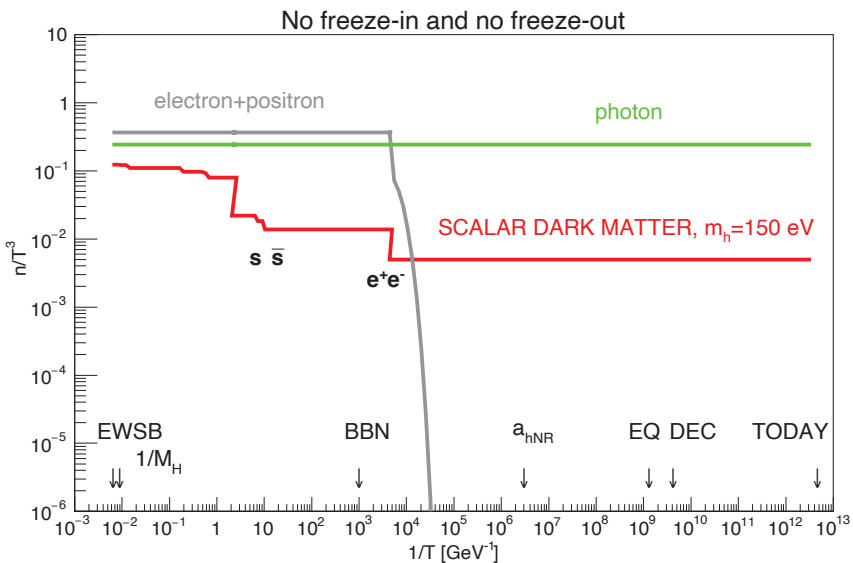
The cold dark matter  $\Lambda$ CDM theory, with only six parameters, is in spectacular agreement with the large scale phenomena of the “Cosmic Microwave Background Radiation”, “Baryon



Acoustic Oscillations”, and the large scale matter distribution of the universe. However, there are, or appear to be, tensions with small scale phenomena, less than the size of the Galaxy, known as the “Core-Cusp Problem”, the “Missing Satellites Problem”, and the rest frame ultra-violet luminosity cut-off required to not exceed the “Reionization Optical Depth” measured by the Planck collaboration. Adding to the cold dark matter  $\Lambda$ CDM theory one more parameter, namely the adiabatic invariant  $v_{hrms}(1)$ , obtains the warm dark matter  $\Lambda$ WDM cosmology. It turns out that  $\Lambda$ WDM agrees with  $\Lambda$ CDM on large scales, and, with the measured  $v_{hrms}(1)$  and  $k'_{fs}$  indicated above, solves all of the mentioned small scale tensions [18] [22].

### NO FREEZE-IN AND NO FREEZE-OUT

And now comes the miracle. The measured  $k'_{fs}$  and  $v_{hrms}(1)$ , or equivalently, the measured dark matter temperature-to-mass ratio, happen to coincide with the predictions of the “no freeze-in and no freeze-out” scenario of spin zero dark matter particles that decouple early on from the Standard Model sector, e.g. dark matter particles coupled to the Higgs boson, or to the top quark. Let me explain. “No freeze-in” means that dark matter reaches thermal and diffusive, i.e. chemical, equilibrium, in the early universe, with the particles of the “Standard Model of Quarks and Leptons”, or, loosely speaking, with ordinary matter. Dark matter then decouples from the Standard Model sector while still ultra-relativistic. “No freeze-out” means that, when dark matter becomes non-relativistic, its mutual interactions are so weak that these particles do not annihilate each other. An example of spin zero dark matter coupled to the Higgs boson is shown in Figure 3.



**Figure 3.** The “no freeze-in and no freeze-out” warm dark matter scenario is illustrated for spin zero warm dark matter particles coupled to the Higgs boson.  $T$  is the photon temperature, and the  $n_i$ s are particle number densities, i.e. numbers of particles per unit volume. The abbreviations stand for “Electro-Weak Symmetry Breaking”, “Big Bang Nucleosynthesis”, “Equivalence” of matter and radiation densities, and “DECoupling” of photons from Standard Model matter. Dark matter particles become non-relativistic at  $a_{hNR}$ . Time advances towards the right.



If dark matter is created by Higgs boson annihilation or decay, then freeze-in and/or freeze-out lowers the dark matter temperature-to-mass ratio. In this case, the *measured*  $v_{hrms}(1)$  is *evidence* of no freeze-in and no freeze-out, not a coincidence.

If spin zero dark matter is indeed coupled to the Higgs boson [23], then the no freeze-in and no freeze-out scenario, together with the measured dark matter density and measured cosmic microwave background temperature, predicts  $v_{hrms}(1) = 490 \pm 10$  m/s,  $k_{fs} = 1.53 \pm 0.03$  Mpc<sup>-1</sup>, and the mass of the dark matter particles  $m_h = 150 \pm 2$  eV [4], or about 1/3400 of the electron mass. See the Appendix for details of the calculations.<sup>3</sup>For couplings to other massive Standard Model particles, the predictions vary slightly. The data disfavors spin one-half and spin one dark matter coupling to Standard Model particles, since their predicted  $v_{hrms}(1)$  is greater than observations [17].

The minimal extension of the Standard Model to obtain the no freeze-in and no freeze-out scenario of dark matter is to add a real scalar field  $S$  with  $Z_2$  symmetry  $S \leftrightarrow -S$  that couples to the Higgs boson  $\phi$  as  $\mathcal{L}_{S\phi} = -\frac{1}{2}\lambda_{hS}(\phi^\dagger\phi)S^2$  [23]. The fields  $\phi$  [25] and/or  $S$  can be the “inflaton” that drives inflation. For example, for a reheating temperature  $T \approx 10^{15}$  GeV, equilibrium between  $\phi$  and  $S$  is obtained with  $\lambda_{hS} \gtrsim 10^{-7}$ .

## CONCLUSIONS

In summary, we redundantly measure the dark matter temperature-to-mass ratio, and arrive at a plausible, data driven, and detailed solution to the dark matter problem, i.e. the no freeze-in and no freeze-out scenario of scalar dark matter that decouples early on from the Standard Model sector.

## ACKNOWLEDGEMENT

I thank Kirk McDonald for critically reviewing this article and several of the references.

---

<sup>3</sup> Some publications rule out such small  $m_h$ , apparently because they neglect non-linear regeneration of small scale structure [4] [22] [24]. Let us mention that according to “The Review of Particle Physics” [1], limits on dark matter particle mass are  $m_h > 70$  eV for fermions, and  $m_h > 10^{-22}$  eV for bosons, and not several keV.



## REFERENCES

- [1] Particle Data Group et. al. (2020). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020 (8). doi: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
- [2] Zwicky, F. (1937). On the masses of nebulae and of clusters of nebulae. *Astrophys. J.*, 86, 217. doi: <http://dx.doi.org/10.1086/143864>
- [3] Profumo, S. (2017). *An introduction to particle dark matter*. World Scientific. doi: <https://doi.org/10.1142/q0001>
- [4] Hoeneisen, B. (2022a). Comments on warm dark matter measurements and limits. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 12, 94–109. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2022.121006>
- [5] Paduroiu, S., Revaz, Y. and Pfenniger, D. (2015). *Structure formation in warm dark matter cosmologies top-bottom upside-down*. <https://arxiv.org/pdf/1506.03789.pdf>
- [6] Hoeneisen, B. (2022b). Measurement of the dark matter velocity dispersion with dwarf galaxy rotation curves. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 12, 363–381. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2022.124021>
- [7] Boyanovsky, D., de Vega, H. and Sanchez, N. (2008). The dark matter transfer function: Free streaming, particle statistics and memory of gravitational clustering. *Physical Review D*, 78(6). doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.78.063546>
- [8] Song, M., Finkelstein, S. L., Ashby, M. L. N. et al. (2016). The evolution of the galaxy stellar mass function at  $z = 4 - 8$ : A steepening low-mass-end slope with increasing redshift. *ApJ*, 825, 5. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.05636>
- [9] Grazian, A., Fontana, A., Santini, P. et al. (2015). The galaxy stellar mass function at  $3.5 \leq z \leq 7.5$  in the candels/uds, goods-south, and hufd fields. *Astronomy and Astrophysics*, 575, A96. doi: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424750>
- [10] Davidzon, I., Ilbert, O., Laigle, C. et al. (2017). The cosmos2015 galaxy stellar mass function: 13 billion years of stellar mass assembly in 10 snapshots. *Astronomy and Astrophysics*, 605. doi: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730419>
- [11] Bouwens, R. and et al. (2015). Uv luminosity functions at redshifts  $z \approx 4$  to  $z \approx 10$ : 10000 galaxies from hst legacy fields. *The Astrophysical Journal*, 803, 34. doi: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/34>
- [12] Bouwens, R. and et al. (2021). New determinations of the uv luminosity functions from  $z \approx 9$  to  $z \approx 2$  show a remarkable consistency with halo growth and a constant star formation efficiency. *The Astronomical Journal*, 162 (2). doi: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abf83e>
- [13] McLeod, D. and et al. (2015). New redshift  $z \approx 9$  galaxies in the hubble frontier fields: Implications for early evolution of the uv luminosity density. *MNRAS*, 450 (3), 3032. doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv780>
- [14] Lapi, A. and Danese, L. (2015). Cold or warm? constraining dark matter with primeval galaxies and cosmic reionization after planck. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2015. doi: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/09/003>
- [15] Bouwens, R., Illingworth, G. and Oesch, P. (2014). Uv-continuum slopes of  $4000 z \approx 4-8$  galaxies from the hufd/xd, hufd09, ers, candels-south, and candels-north fields. *ApJ*, 793, 115. doi: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/793/2/115>
- [16] Hoeneisen, B. (2022c). Warm dark matter and the formation of first galaxies. *Journal of Modern Physics*, 13, 932–948. doi: <https://doi.org/10.4236/jmp.2022.136053>
- [17] Hoeneisen, B. (2022d). Measurement of the dark matter velocity dispersion with galaxy stellar masses, uv luminosities, and reionization. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 12, 258–272. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2022.123015>
- [18] Hoeneisen, B. (2022e). Warm dark matter and the formation of first galaxies. *Journal of Modern Physics*, 13, 932–948. doi: <https://doi.org/10.4236/jmp.2022.136053>
- [19] Hoeneisen, B. (2019a). The adiabatic invariant of dark matter in spiral galaxies. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 9, 355–367. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2019.94025>
- [20] Oh, S. and et al. (2015). High-resolution mass models of dwarf galaxies from little things. *The Astronomical Journal*, 149, 180. doi: <https://doi.org/10.1088/0004-6256/149/6/180>
- [21] Hoeneisen, B. (2019b). A study of dark matter with spiral galaxy rotation curves. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 9, 71–96. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2019.92007>



- [22] Hoeneisen, B. (2023). A study of warm dark matter, the missing satellites problem, and the uv luminosity cut-off. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 13, 25–38. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2023.131002>
- [23] Hoeneisen, B. (2021). Adding dark matter to the standard model. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 11, 59–72. doi: <https://doi.org/10.4236/ijaa.2021.111004>
- [24] Hoeneisen, B. (2020). What is dark matter made of? [Presentado at the 3rd World Summit on Exploring the Dark Side of the Universe Guadeloupe Islands, March 9-13 2020]. <https://inspirehep.net/files/7cfb2bf406baf315315e389e6eff3809>
- [25] Bezrukov, F., Magnin, A., Shaposhnikov, M. and Sibiryakov, S. (2011). Higgs inflation: Consistency and generalisations. *JHEP*, 01, 016. doi: [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2011\)016](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2011)016)

## APPENDIX A: THE NO FREEZE-IN AND NO FREEZE-OUT SCENARIO

We present a summary of Section 3 of [4] to make the present article self-contained.

We assume that the ultra-relativistic dark matter is in thermal and diffusive equilibrium with the Standard Model sector in the early universe. In particular we assume that the ultra-relativistic dark matter has zero chemical potential. We assume that dark matter decouples from the Standard Model sector while still ultra-relativistic. As the universe expands, dark matter cools and becomes non-relativistic. We assume that the ultra-relativistic Bose-Einstein or Fermi-Dirac momentum distribution of dark matter relaxes to the corresponding non-relativistic distribution, as justified in [5], thereby acquiring a negative chemical potential [5].

Let  $T_h/T$  be the dark matter-to-photon temperature ratio after decoupling of neutrinos, and after  $e^+e^-$  annihilation, and before dark matter becomes non-relativistic. This ratio is [5] [4]

$$\frac{T_h}{T} = \left( \frac{43}{11g_{\text{dec}}} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

where  $g_{\text{dec}} = \sum N_b + (7/8) \sum N_f$  at decoupling of dark matter from the Standard Model sector [1].  $N_f$  ( $N_b$ ) is the number of fermion (boson) spin polarizations. The ratio of number densities of dark matter particles and photons, after  $e^+e^-$  annihilation until the present time, is [5] [4]

$$\frac{n_h}{n_\gamma} = \frac{43g'_h}{22g_{\text{dec}}}, \quad (3)$$

where  $g'_h = N_b + 3N_f/4$  for the dark matter [5]. Then, at the present time,

$$\Omega_c h^2 = \frac{n_h m_h h^2}{\rho_{\text{crit}}} \approx \frac{114}{g_{\text{dec}}} \frac{g'_h}{1.5 \text{ keV}} m_h \quad (4)$$

determines the dark matter particle mass  $m_h$  corresponding to no freeze-in and no freeze-out.



For fermions, from equation (26) of [5], we obtain

$$m_h = 108 \left( \frac{0.76 \text{ km/s}}{v_{\text{hrms}}(1)} \right)^{3/4} \left( \frac{2}{N_f} \right)^{1/4} \text{ eV}, \quad (5)$$

$$\frac{T_h}{T} = 0.336 \left( \frac{v_{\text{hrms}}(1)}{0.76 \text{ km/s}} \right)^{1/4} \left( \frac{2}{N_f} \right)^{1/4}. \quad (6)$$

For bosons, from equation (28) of [5], we obtain

$$m_h = 108 \left( \frac{0.76 \text{ km/s}}{v_{\text{hrms}}(1)} \right)^{3/4} \left( \frac{1}{N_b} \right)^{1/4} \text{ eV}, \quad (7)$$

$$\frac{T_h}{T} = 0.385 \left( \frac{v_{\text{hrms}}(1)}{0.76 \text{ km/s}} \right)^{1/4} \left( \frac{1}{N_b} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Note that the measurement of the adiabatic invariant  $v_{\text{hrms}}(1)$  allows a determination of the dark matter particle mass  $m_h$ , and of the ratio  $T_h/T$  (that determines the dark matter decoupling temperature, if sufficiently precise).



## Bioaccessibility as a tool for planning bioremediation of petroleum-polluted soil

Daniel Hidalgo-Lasso<sup>1</sup>, Karina García-Villacís<sup>1</sup>, Juan López Montalvo<sup>1</sup>, Patricia Yanez-Torres<sup>1</sup>, Darwin Marín Tapia<sup>1</sup>, Jeaneth Urvina Ulloa<sup>1</sup>, Paul Vargas-Jentsch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales del Proyecto Amazonía Viva, Empresa Pública EP PETROECUADOR, 4 1/2 km vía Joya de los Sachas-Coca, Joya de los Sachas 2201010, Ecuador;

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Nucleares, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Ecuador.

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [Karina.Garcia@epetroecuador.ec](mailto:Karina.Garcia@epetroecuador.ec)

## La bioaccesibilidad como herramienta de planificación de la biorremediación de suelos contaminados con petróleo

### Abstract

Soil contamination caused by petroleum-related oil spills is a relevant problem in the Ecuadorian Amazon region. Bioremediation is a usual technique to clean up the soil. In this study, treatment efficiency in soils contaminated by Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) was evaluated using microcosms (natural attenuation vs. biostimulation) and field assays (landfarming and windrows with and without aeration). Moreover, the final TPH of each experiment was contrasted with the concentration of non-bioaccessible hydrocarbons, following the hypothesis that only the bio-accessible fraction of contaminant can be metabolized. The TPH remotion in field assays was higher than in microcosms assays, observing that aeration is a crucial factor. In microcosms, there were no statical differences between natural attenuation and biostimulation. There was no observed clear relation between non-accessible hydrocarbons and the end-point remediation. However, the method must be standardized according to the potential application of this parameter to set up feasible bioremediation goals.

### Keywords

Bioremediation efficiency, petroleum-hydrocarbons, soil contamination, risk assessment, Ecuadorian Amazon region, oil liability

### Resumen

La contaminación de suelos por hidrocarburos de petróleo en la Amazonía ecuatoriana es un problema ambiental relevante. La biorremediación es ampliamente utilizada para remediar este suelo. En este estudio se evaluó la eficiencia de tratamiento al aplicar biorremediación en microcosmos (atenuación natural vs bioestimulación), y condiciones de campo ("landfarming" y biopilas con y sin aireación, cada uno) en suelos contaminados, con hidrocarburos totales de petróleo (TPH). Las concentraciones no removidas de TPH fueron comparadas con la concentración de hidrocarburos no bioaccesibles, cuantificados para cada tratamiento utilizando tres métodos de extracción no exhaustiva con alcoholes (1-propanol, 50% 1-propanol y 1-butanol), con la hipótesis de que solo las fracciones bioaccesibles pueden ser biodegradadas. Se observó una



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
14/05/2022

Aceptado /  
Accepted:  
25/11/2022

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



mayor eficiencia de remoción de TPH en los ensayos de campo que en los de laboratorio, determinándose que la aireación es un factor clave en la biorremediación. En los ensayos de laboratorio no se observó un efecto significativo al aplicar bioestimulación. No se observó una correlación entre los valores de bioaccesibilidad de hidrocarburos y los concentración final de TPH. Estos resultados sugieren que la bioaccesibilidad debería ser usada como herramienta para establecer metas de biodegradación factibles por lo que el método requiere ser estandarizado.

### Palabras clave

Eficiencia de biorremediación, hidrocarburos de petróleo, suelo contaminado, análisis de riesgo, región amazónica ecuatoriana, pasivo ambiental

---

## INTRODUCTION

Modern society bases its economy on petroleum (and its derivatives); therefore, this natural resource is a crucial commodity in the financial system and global economy. Petroleum exploitation involves activities implying many potential environmental impacts [1], mainly affecting soil and water. Oil spills are difficult to avoid during petroleum extraction, processing, and delivery, even when all regulatory requirements are fulfilled [2]. Soil is a receptor of pollutants of anthropogenic origin that contribute to land degradation with negative consequences on the food chain, public health, and water and air quality [3,4]. Soil protection is key to achieving the Sustainable Development Goals proposed by the United Nations [5].

Bioremediation is a cost-effective and commonly used technique for treating soils and sediments contaminated with petroleum hydrocarbons [6]. However, the efficiency of this process is usually affected by many factors, such as microbial composition, the contaminant (toxicity, structure, concentration), environmental conditions (pH, salinity, nutrients availability), cometabolism, type of process (aerobic vs. anaerobic), mass transfer limitation, and bioavailability of contaminant [7].

Biodegradability is the assimilation of a compound (pollutant) by organisms for the biosynthesis of cellular components or complete mineralization to obtain energy or inorganic nutrients. The composition of the microbial community during the degradation process is dynamic, the predominant group being bacteria [8,9].

Favorable environmental conditions for the growth of microorganisms are necessary for bioremediation. Microorganisms need the proper nutrients to produce the necessary enzymes to break down the contaminants. Also, nutrients, pH, temperature, and moisture influence microbial growth. Therefore, the proper environmental conditions must be established (and maintained) to ensure that microorganisms can degrade a pollutant [1].

Recalcitrance and persistence are closely related. According to the European Environmental Agency, the term recalcitrant is “applied to pollutants which are not biodegradable or are only biodegradable with difficulty” [10]. Persistence is a broader concept; a chemical is persistent if it is not degraded by biological, chemical, or physical



processes. Persistence, often assessed with bioaccumulation and toxicity, is a significant complex criterion for remediation assessment [11].

Bioavailability is the degree to which chemicals present in the soil may be taken up or metabolized by human or ecological receptors or are available for interactions with biological systems [12]. According to [13], bioavailability has two complementary sides: accessibility and chemical activity. Bioaccessibility describes the total fraction of contaminants potentially available over time [14]; this fraction reduces the time and cost associated with determining bioremediation treatment of contaminated soils [15].

On the other hand, chemical activity is measured with equilibrium sampling devices and quantifies the potential for spontaneous physicochemical processes (such as diffusion, sorption, or partitioning).

The assessment of these two aspects allows risk evaluation of polluted places and tailoring to specific protection goals. The main reason is that the mere presence of a contaminant, by definition, does not mean an actual risk or a measurable effect on an ecosystem [13,16].

At a field scale, bioremediation is performed either *in situ* or *ex situ*. *In situ* techniques have the remarkable advantage that the material is treated in the same place where the spill occurred; therefore, the transport of polluted soil (and associated costs) is avoided. On the other hand, *ex situ* techniques require the movement of polluted soils. *Ex situ* techniques are more efficient than others and, generally, require less time to complete the process. Moreover, their monitoring is easier, and so is ensuring proper conditions (among them, maintaining the homogeneity of the material) to facilitate the remediation process [17,18].

In the Ecuadorian Amazon region, around 2,550 pollution sources, categorized as tailing ponds, waste pits, and spills, were attributed to former oil industry activities in the country [19]. The estimated amount of polluted soil is around 5,317,808 m<sup>3</sup>. Up to July 2022, EP PETROECUADOR and its Project Amazonia Viva (P.A.V.) had eliminated 1,095 pollution sources and cleaned up to 1,431,000 m<sup>3</sup> of soil. The average cost for each cubic meter of cleaned soil is 65.84 USD. Remediation results comply with Ecuadorian standards, which are presented in Table 1 [20]. P.A.V. had been using either landfarming or windrows for the remediation of soils since these strategies showed cost and social advantages.

**Table 1.** Standards for soil quality according to Ecuadorian legislation applicable to remediation of soil contaminated with petroleum-hydrocarbons. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Pollutant	Unit	Soil use			
		Residential	Commercial	Industrial	Agricultural
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)	mg/kg	230	620	620	150
Aromatic Polycyclic Hydrocarbons (PAH)	mg/kg	21.3	123.7	522.7	1.2
Cadmium (Cd)	mg/kg	4	10	10	2
Nickel (Ni)	mg/kg	100	100	50	50
Lead (Pb)	mg/kg	140	150	150	60



This study aimed to evaluate landfarming and windrows as bioremediation techniques for removing Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) from soils under field conditions in the Ecuadorian Amazon rainforest. These results were compared with TPH removals achieved under laboratory conditions. At this stage, bioaccessibility estimations were proposed as a theoretical maximum of TPH removal to calculate efficiencies. The importance of bioavailability in setting up feasible bioremediation goals is discussed.

## MATERIALS AND METHODS

### Characteristics of polluted soil and treatment center

A mixture of 1,000 m<sup>3</sup> of contaminated soil was obtained from a pollution source of petroleum activities located in the province of Francisco de Orellana, in the Ecuadorian Amazon region. The soil was taken to the Treatment Center CGP\_YU\_04 (E 301908.7556 W 9946516.921) for the bioremediation assays. CGP\_YU\_04 consisted of a flat surface with a slope of 2%, was waterproofed with compacted clay, and had a perimeter canal for retrieving and treating leach. Relevant meteorological data during the trials were: average semi-annual precipitation of 1,774.1 mm and semi-annual average absolute maximum temperature of 34.3 °C.

The soil had an average density of 1.35 g/cm<sup>3</sup> and a pH of 5.67. According to the USDA texture triangle, the soil is classified as clay-loam. Previous to the assays, the soil was homogenized for three days using a hydraulic backhoe loader (CATERPILLAR model 420-E), and stones and any other debris were removed.

### Assays under laboratory conditions

One kilogram of soil was collected from the stock located at CGP\_YU\_04, keeping sterile conditions. Prior to the experiment, it was passed through a 2-mm stainless steel sieve. Biodegradation assays using slurry-phase microcosms were done following the methodology proposed by Kuppusamy et al., 2016 [17].

Two treatments were carried out using 1 L sterile glass bottles: Biostimulation (TL<sub>0</sub>) with 100 cm<sup>3</sup> of soil, 200 cm<sup>3</sup> of distilled water, and 15 cm<sup>3</sup> of basal mineral medium without carbon, supplemented with crude oil of "Planta de Tratamiento de crudo" (Mills et al., 1978)[21]; and No-biostimulation (TL<sub>1</sub>), without the addition of medium. Microcosm experiments were incubated at 30 °C in the dark and stirred at 120 rpm using two Wise-Cube shaking incubators model WIS-20R.

To accommodate the measurement of many parameters throughout the experiment, multiple replicate microcosms were set up for each treatment and sacrificed after the sampling.

In total, 36 microcosms were made (2 treatments x 3 replicates x 9 samplings). Sampling was performed on days 1, 7, 14, 21, 28, 56, 72, 84, and 112. Assays were done at Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales in Joya de Los Sachas, Orellana Province (Ecuador).

## Assays under field conditions

The windrows and landfarming techniques, with and without mechanical aeration, were tested, for comparative purposes, in experimental units of 120 m<sup>3</sup>. The following were the tested treatments: Windrows without aeration (W), Windrows with aeration (W+A), Landfarming without aeration (L), and Landfarming with aeration (L+A) (Fig. 1). The treatments were tested in triplicate. Volumes were determined through R.T.K. surveying technology using a Trimble G.P.S. model TSC3. A windrow unit had a length of 20 m, a width of 2.5 m, and a height of 2.4 m. A landfarming unit had a length of 40 m, a width of 7.5 m, and a height of 0.4 m.



**Figure 1.** Bioremediation field assays. **A)** Windrows. **B)** Landfarming. Source: Authors.

For landfarming, aeration was planned biweekly and carried out by plowing with a MASSEY-FERGUSON tractor model 4291 and the same backhoe described before for windrows. Static aeration was not possible for windrows since the soil is easily compacted in the absence of movement due to its clay content, the influence of rainwater, and high temperatures.

The sampling of each experimental unit was done according to the guidelines detailed in [22]. After the aeration, one kilogram of soil composed of 10 subsamples was collected for each treatment. For the windrows, subsamples were collected following a zig-zag pattern from the base, center, and top. For landfarming, samples were collected from the surface layer (20 cm in depth) following an X pattern.



Samples were collected on days 1, 7, 14, 28, 56, 84, 112, and 140. Due to adverse climatic conditions (heavy rain) and unavailability of machinery for aeration, no samples were collected on days 21 and 72.

### Analytical methods

Before chemical and microbiological analysis, the soil samples were air-dried at room temperature. For each experiment (laboratory and field conditions), the following parameters were analyzed: TPH, Hydrocarbon-Degrading Microorganisms (HDM), and Total-Heterotrophic Microorganisms (THM). Non-Bioaccessible-Hydrocarbons concentration was quantified only at the beginning (day 7) because this parameter provides a theoretical approach to the amount of contaminant potentially available over time [15]. The pH value was measured at the beginning and end using the electrometry method EPA 9045D [23].

Three grams of soil were used to determine TPH concentration following the method EPA 8440 [24] with a Nicolet™ iS™ 5 FTIR Spectrometer (Thermo Scientific™). To quantify Non-Bioaccessible-Hydrocarbons, the procedure described by [15] was applied. This procedure is based on non-exhaustive extractions with different alcohols. In short, 5 g of soil was mixed with 50 mL of alcohol at 150 rpm for 60 min (temperature 25 °C). The following alcohols were tested: 1-butanol (99.5%, Fischer Scientific), 1-propanol (99.5%, Sigma-Aldrich), and 1-propanol (50%, Sigma-Aldrich). Afterward, the suspension was centrifuged at 3,000 G for 5 min. Non-bioaccessible hydrocarbons were quantified in the pellet using the Method EPA 8440 [24]. The content of Bioaccessible-Hydrocarbons was obtained by the arithmetical subtraction of Non-Bioavailable Hydrocarbons from TPH.

HDM was determined by counting colonies growing on a Solid Basal Mineral Medium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 2.0 g/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ : 0.89 g/L,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ : 1.25 g/L,  $\text{FeCl}_3$ : 0.6 mg/L), as described in [25], and supplemented with petroleum as the only carbon source (23°API coming from the deposit tanks of EP PETROECUADOR Sacha-oil facilities, province of Orellana, Ecuador). Plates were incubated for up to 48 h at 30 °C, and THM was determined by counting colonies growing on Nutrient Agar (Merck) [12].

### Statistical analysis

As mentioned before, all analyses were carried out in triplicate. Using the individual analysis results, the average, standard deviation, and percentage error were calculated for each parameter. By the use of the Infostat software, degradation curves of each treatment were compared to each other by applying ANOVA and a Tukey test with a significance of 0.05.

## RESULTS

[15] mentioned that THM prefers a nearly neutral pH; they observed the maximum degradation of petroleum hydrocarbons at a pH of 7.5.

At the laboratory scale, the initial pH value of the soil was 5.67 and was easily adjusted to pH 7.00 by adding a 0.1 N NaOH solution. A periodical adjustment was necessary. The final pH values were between 6.78 and 6.91. At the field scale, the initial pH values of soils



were between 4.64 and 5.57, and they reached values of 5.02 to 5.60 with the addition of agricultural lime. In this case, a pH value of 7.00 was not achieved.

### TPH remotion

The degradation curve of TPH in laboratory assays shows a total TPH-remotion of 25.15% in TL<sub>0</sub> and 26.50% in TL<sub>1</sub>. Both curves have a correlation index of 0.877, without a statical difference ( $P < 0.05$ ). A fluctuating TPH was observed with periodic increments (days 7, 21, and 72) and decrements (days 14, 56, and 112). No stabilization of the curve was observed. Day 112 was considered the end of the experiment in concordance with observations in real scenarios in the field (Fig. 2A).

On the other hand, field assays show TPH-remotion of 11.2, 27.9, 28.6, and 43.6% for W, W+A, L, and L+A, respectively. Three different statistical groups were found—W+AIR and L+AIR, W, and L—evidence that aeration during soil treatments is a crucial factor in TPH-remotion (see Fig. 2B). Similarly to laboratory assays, fluctuating TPH was observed, with two increments on days 28 and 112. TPH at day 140 was considered the end-point, with TPH comparable to day 84. Tables S1 and S2 of Supplementary Material show the rates of TPH-remotion in laboratory and field assays.

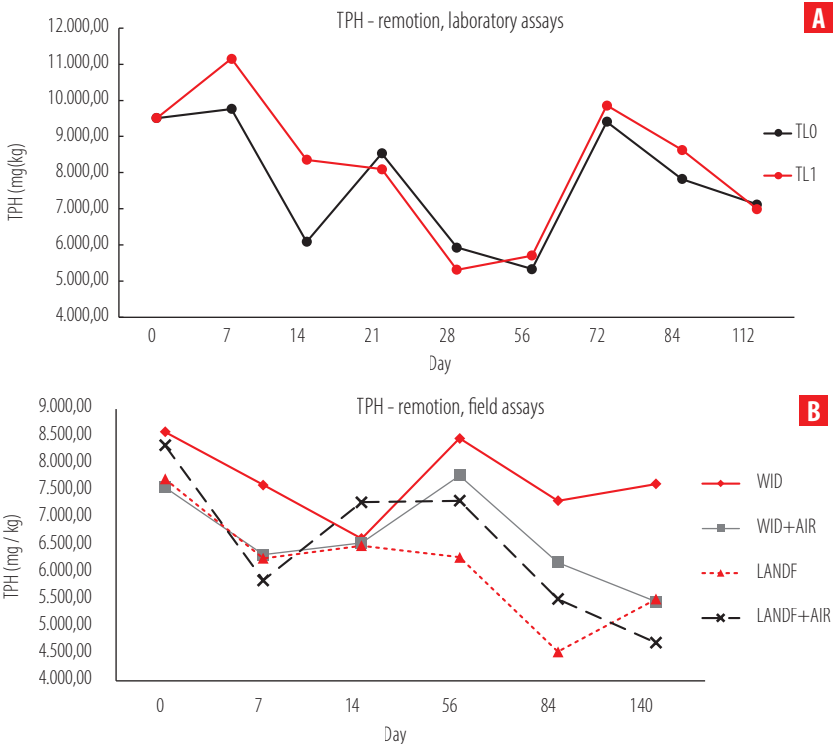


Figure 2. TPH-remotion curves. A) Laboratory assays. B) Field assays.



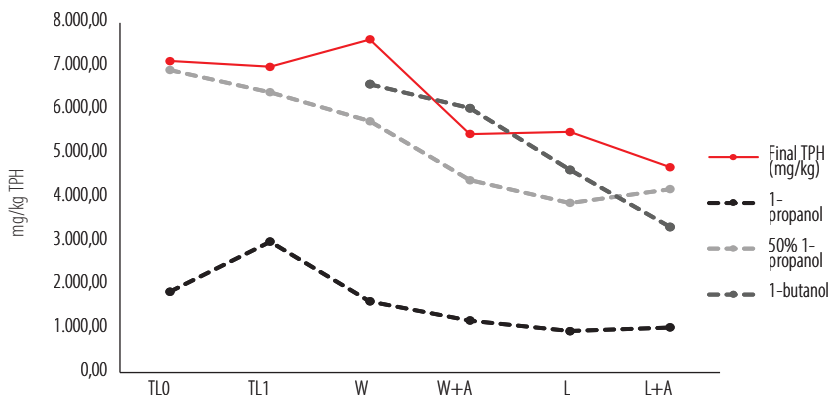
### Prediction of end-point remediation using non-bioaccessibility of hydrocarbons

A correlation was expected between the non-accessible hydrocarbon concentration and the final TPH (end-point remediation). However, the three alcohol-extraction methods used to quantify the non-bioaccessibility hydrocarbons do not show a clear correlation to the final TPH, with correlation coefficients of 0.23, 0.45, and 0.73 when the extraction was performed with 1-butanol, 1-propanol, and 50% 1-propanol, respectively (Table 2).

**Table 2.** Non-bioaccessible Hydrocarbons quantified using three alcohol-extraction protocols.

Treatment	Lab and field assays				Theoretical remotion					
	TPH (mg/kg)		TPH removed		1-propanol		50% 1-propanol		1-butanol	
	Initial	Final	SD	TPH removed (%)	Non-Bioaccessible-Hydrocarbons (mg/kg)	TPH removed (%)	Non-Bioaccessible-Hydrocarbons (mg/kg)	TPH removed (%)	Non-Bioaccessible-Hydrocarbons (mg/kg)	TPH removed (%)
TL <sub>0</sub>	9,513.50	7,120.39	222.28	25.15	1,851.78	80.54	6,914.88	27.32	37,769.90	-297.01
TL <sub>1</sub>	9,513.50	6,992.29	721.27	26.50	2,994.06	68.53	6,408.25	32.64	98,634.25	-936.78
W	8,578.47	7,618.60	556.41	11.19	1,629.40	81.01	5,747.65	33.00	6,594.07	23.13
W+A	7,557.98	5,452.68	493.77	27.86	1,189.27	84.26	4,401.20	41.77	6,050.73	19.94
L	7,712.46	5,503.00	606.74	28.65	949.69	87.69	3,878.52	49.71	4,636.36	39.88
L+A	8,330.65	4,696.44	540.76	43.62	1,033.25	87.60	4,193.34	49.66	3,336.54	59.95

The non-bioaccessible hydrocarbons detected using 50% 1-propanol were comparable to final TPH in treatments TL<sub>0</sub>, TL<sub>1</sub>, and L+A, while the results with the 1-butanol extraction were related to W, W+A, and L. The non-bioaccessible hydrocarbon method determined with 1-propanol did not relate to any treatment (Fig. 3).



**Figure 3.** Prediction of end-point remediation using 3-alcohol extraction methods of non-accessible hydrocarbons. Data of 1-butanol on treatments TL<sub>0</sub> and TL<sub>1</sub> are not shown because values are higher than the initial TPH.





**Growth curves of microorganisms**

For laboratory experiments, growth curves for THM and HDM in the treatment TL<sub>0</sub> and TL<sub>1</sub> did not show statistical differences (p=0.517 and p= 0.346, respectively). The population of THM varies from 6.15x10<sup>4</sup> to 1.03x10<sup>6</sup> CFU/g, and HDM varies from 1.6x10<sup>4</sup> to 1.05x10<sup>7</sup> CFU/g.

Tables 3 and 4 show a low correlation coefficient between the TPH of each treatment and the logarithm of count CFU of THM and HDM, obtaining correlation coefficients less than 0.15.

**Table 3.** ANOVA Friedman (0.05) of THM in lab and field assays.

Lab assays							
Treatment	THM (UFC/g)	Standard Deviation	E.E.	CV	Correlation with TPH (R <sup>2</sup> )	p	letter
TL <sub>0</sub>	5.99	0.31	0.11	5.1	0.143	0.517	A
TL <sub>1</sub>	5.94	0.30	0.11	5.09	0.119		A
Field assays							
W	6.17	0.68	0.26	11.06	0.313	0.507	A
W+A	6.08	0.42	0.16	6.98	0.436		A
L	6.1	0.51	0.19	8.32	0.001		A
L+A	5.94	0.43	0.16	7.22	0.144		A

**Table 4.** ANOVA Friedman (0.05) of HDM in lab and field assays.

Lab assays							
Treatment	HDM (UFC/g)	Standard Deviation	E.E.	CV	Correlation with TPH (R <sup>2</sup> )	p	letter
TL <sub>0</sub>	5.59	0.84	0.28	15.04	0.155	0.347	A
TL <sub>1</sub>	5.80	0.80	0.27	13.79	0.016		A
Field assays							
W	5.2	0.53	0.20	10.13	0.005	0.875	A
W+A	5.28	0.58	0.22	11.01	0.731		A
L	5.29	0.62	0.23	11.71	0.363		A
L+A	5.11	0.51	0.19	9.91	0.538		A

In the same way, in the field assays, four treatments had similar results without a statistical difference, p= 0.5071 for THM and p=0.8751 for HDM. A higher correlation coefficient was obtained in count CFU of HDM to windrows with air with TPH (R<sup>2</sup>= 0.731). In the remaining treatments, the correlation coefficient was less than 0.44.

**DISCUSSION**



## Evaluation of landfarming and windrows as bioremediation techniques

In this study, bioremediation in microcosms reveals that biostimulation does not produce a significantly better performance than natural attenuation. In contrast to other research [26,27, 28], where it is observed that bioremediation in laboratory conditions gets a similar or greater removal of TPH compared to field assays, in this study, the percentages of TPH removal in microcosms were lower than field assays except for windrows treatment. This result suggests that environmental conditions typical of the Amazon region, specifically the sun radiation, high humidity, and high temperatures that raise soil temperature, could promote biodegradation in field assays. Previously it was observed that both physicochemical (temperature, initial hydrocarbon concentration) and biological variables play a fundamental role in TPH removal [29].

Treatment efficiency under field conditions varies according to the treatment method: landfarming or windrows. Overall, landfarming had a better performance than windrows for TPH removal: 43.62% of efficiency vs. 27.86% for the respective aerated treatments. Even the non-aerated landfarming treatment (28.65% of efficiency) obtained similar results as the aerated windrows. This fact implies that landfarming is a feasible alternative to treatment; it is impossible to give enough aeration. However, the main disadvantage is the necessary area. In our trials, we needed 300 m<sup>2</sup> of surface to treat 120 m<sup>3</sup> of soil for landfarming, which means 2.5 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> of soil treated.

Meanwhile, for windrows, the same volume was treated in 50 m<sup>2</sup>, equivalent to 0.42 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> soil treated. Therefore, landfarming needs six times more space than windrows. Accordingly, it could be improved by increasing the height of the landfarming unit. Therefore, having an appropriate machine to work deep enough and remove the complete volume of soil in treatment is necessary.

Comparing the non-aerated vs. aerated treatments for each case (W vs. W+A and L vs. L+A) shows that air injection is essential for effective biodegradation. However, other research has reported that a 10–40% oxygen level is required for effective hydrocarbon biodegradation [30].

In contrast with other studies of bioremediation counting of THM and HDM, microbial countings do not correlate with the TPH degradation rates [31]. No significant difference was found between the treatments in the field and laboratory assays. However, the population of THM and HDM had moments of increase throughout the 112 days of the project, which indicates that the number of microbial populations was not influenced by the bioremediation treatments, suggesting that the composition of the microbial population is affected by the environmental conditions and the composition of the hydrocarbons. Similar results have been reported in [32].

## Prediction of end-point remediation using non-bioaccessibility of hydrocarbons

The 50% 1-propanol extraction method showed a high correlation coefficient with the final TPH in this study. However, this value is not near zero to accurately be used to predict biodegradation end-points, as suggested by [33].

In previous research about the application of non-bioaccessible hydrocarbons to predict



end-point bioremediation, fractions of hydrocarbons were analyzed separately, obtaining specific correlation coefficients for each one [15,34,35]. This study aimed to quantify the bioaccessibility of TPH related to estimating the maximum TPH removal in field assays. The results obtained reflect the analysis for a few samples (three for each treatment); therefore, the next step is to standardize the extraction method using more samples and different soils. [36] obtained similar results by analyzing Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.

This study was performed in 2018 with the available information [15]; however, the international standard ISO 16751:2020 (2020) [37] for assessing the potentially bioavailable fraction of non-polar organic compounds could be used.

The local environmental legislation determines remediation goals, and in cases like Ecuador, this is related to the removal of a pollutant and measured for its total concentration. Therefore, and according to Table 2, if the value of the bioavailable fraction is not enough to fulfill the requirement of the environmental legislation, a non-biological treatment is needed to achieve the remediation goals, either as the primary treatment or as a complementary one. The latter drives the necessity to incorporate Bioavailability analysis before starting remediation treatments. A decision matrix is presented in Figure 4 for the decision of the chosen technology implemented for the remediation process.

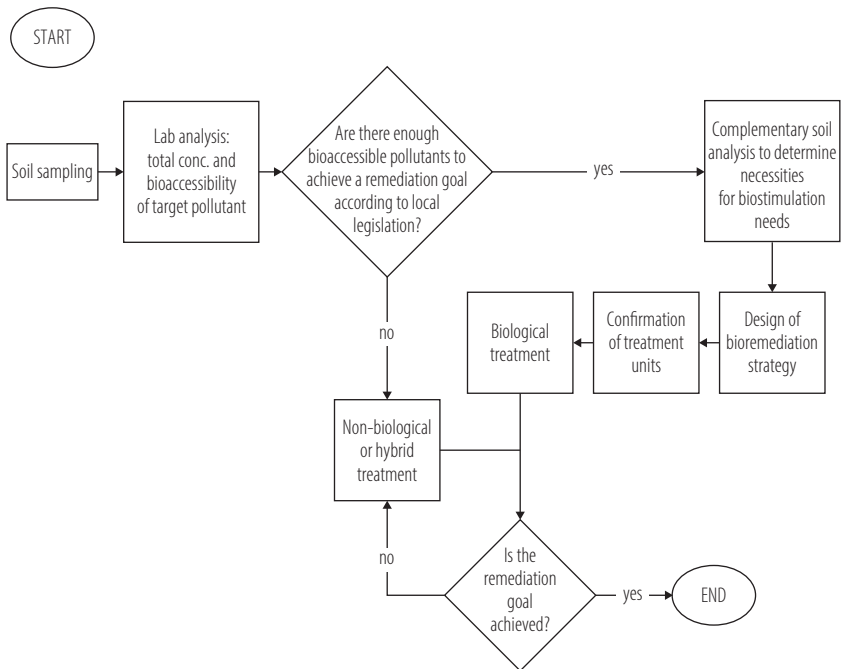


Figure 4. Decision matrix for choosing technology in the soil remediation process. Source: Authors.



The Ecuadorian environmental legislation determines that remediation goals are related to the total concentration of contaminants. Therefore, if the bioavailable fraction is not enough to fulfill the requirement of the environmental legislation limits, a non-biological treatment is needed to achieve the remediation goals. So, it will be necessary to incorporate bioavailability before starting remediation treatments to estimate the treatment time and the other resources needed.

Scientific developments in bioavailability are not always translated into approaches ready to use for regulators; thus, within the regulatory frameworks are uncharted fields regarding regulation and approval of organic chemicals.

A survey conducted in the UK about bioavailability applicability in risk-based regulation contacted 375 local authorities. 78% of the respondents expressed concern that the lack of statutory guidelines was hampering the application of bioavailability to the risk assessment and management of contaminated land. However, bioavailability in regulatory frameworks is still a fair limit in some countries (the Netherlands and Australia) [11,14, 38].

In this research, neither Landfarming nor Windrows reached TPH concentrations to meet Ecuadorian standards, being necessary to complement biological processes with other technologies to meet those legal requirements. For example, a Life Cycle Assessment performed on another remediation project in a nearby area (Joya de Los Sachas, Ecuador) recommended lowering the use of vehicles and heavy machinery and making thoughtful route planning to maintain the sustainability of the whole process [39]. Then, the question remains on whether it is necessary to keep working on the pollutant degradation if the toxicity associated with bioaccessible hydrocarbons is not a problem since most bioaccessible fractions were already (bio)degraded. These additional works may negatively impact the sustainability of the project.

## CONCLUSIONS

Landfarming was more efficient than windrows. In all cases, aeration is a decisive factor for TPH removal; however, it is necessary to make a previous characterization that includes bioaccessibility measurements to determine the biodegradable fractions and establish realistic remediation goals.

It is necessary to apply a standardization on the method to quantify the bioaccessibility of hydrocarbons in soils using the protocol described at ISO 16751. Moreover, further tailor-made research on field conditions is needed to corroborate what the literature says: bioavailability, biodegradability, and toxicity are highly correlated. Developing this research may lead to obtaining analytical tools to prioritize the treatment of pollutants with high risk in contrast to the ones with higher concentrations.

Bioaccessibility and bioavailability are concepts that should be integrated into the Ecuadorian environmental legislation to improve the assessment of remediation projects.



## ACKNOWLEDGMENTS

To EP PETROECUADOR for funding this project. To Marivi Vargas, Geovanny Ureña, Luis Quesada, Luis Solórzano, Edison Calle, and Patricio Gómez Ortega for their help with laboratory and field trials. The authors acknowledge the support of coworkers from PAV-Auca and PAV-SIMP for their help with logistics to carry out field activities.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D.H.L.; methodology, D.H.L.; investigation, D.H.L., J.L.M., P.Y.T., D.M.T., K.G.V.; data curation, D.H.L., K.G.V., P.V.J.; writing—original draft preparation, D.H.L.; writing—review and editing: K.G.V., J.U.U., P.V.J.; project administration, D.H.L., J.C.L.M.; funding acquisition, K.G.V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Hidalgo-Lasso / García-Villacis / López / Yáñez-Torres / Marín / Urvina / Vargas-Jentsch (2023)
- [1] Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172. <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>
- [2] Fuentes, S., Méndez, V., Aguila, P., & Seeger, M. (2014). Bioremediation of petroleum hydrocarbons: Catabolic genes, microbial communities, and applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, 4781–4794. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5684-9>
- [3] Nunes, D., Salgado, A., Gama-Rodrigues, E., Taketani, R., Cunha, C., & Da Servulo, E. (2020). Use of plant materials for the bioremediation of soil from an industrial site. Part A. *J. Environ. Sci. Health*, 55, 650–660. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1726695>
- [4] Prävälje, R. (2021). Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. *Earth-Sci. Rev.*, p. 220, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103689>
- [5] Paleari, S. (2017). Is the European Union protecting soil? A critical analysis of Community environmental policy and law. *Land Use Policy*, 64(3), 163–17. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.007>
- [6] Ajona, M., & Vasanthi, P. (2021). Bioremediation of petroleum contaminated soils – A review. *Materials Today: Proceedings*, 45(1), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.949>
- [7] Kebede, G., Tafese, T., Abda, E., Kamaraj, M., & Assefa, F. (2021). Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts. (Y. He, Ed.) *Journal of Chemistry*(9823362), 17 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>
- [8] Cui, J., He, Q., Liu, M., Chen, H., Sun, M., & Wen, J. (2020). Comparative Study on Different Remediation Strategies Applied in Petroleum-Contaminated Soils. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 1606. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051606>
- [9] Shahi, A., Aydin, S., Ince, B., & Ince, O. (2016). Evaluation of microbial population and functional genes during the bioremediation of petroleum-contaminated soil as an effective monitoring approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 125, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.029>
- [10] European Environment Agency. (2021). *Glossary*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/chm-biodiversity/recalcitrant>
- [11] Ortega-Calvo, J., Stibany, F., Semple, K., Schaeffer, A., Parsons, J., & Smith, K. (2020). Why Biodegradable Chemicals Persist in the Environment? A Look at Bioavailability. In J. Ortega-Calvo, J. Parsons, & J. Robert, *Bioavailability of Organic Chemical in Soil and Sediment. The Handbook of Environmental Chemistry*. (p. 243-265). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-586-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-90-481-586-5_12)
- [12] ISO 17042:2008. (2008). Soil quality - Requirements and guidance for the selection and application of methods for the assessment of bioavailability of contaminants in soil and soil materials.
- [13] Reichenberg, F., & Mayer, P. (2006). Two complementary sides of bioavailability: Accessibility and chemical activity of organic contaminants in sediments and soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25, 1239-1245. <https://doi.org/10.1897/05-458r.1>
- [14] Ortega-Calvo, J., Harmsen, J., Parsons, J., Semple, K., Aitken, M., Ajao, C., Eadsforth, C., Galay-Burgos, M., Naidu, R., Oliver, R., Peijnenburg, W., Römbke, J., Streck, G., & Versonnen, B. (2015). From Bioavailability Science to Regulation of Organic Chemicals. *Environmental Science & Technology*, 49, 10225-10264. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b02412>
- [15] Dandie, C., Weber, J., Aleer, S., Adetutu, E., Ball, A., & Juhasz, A. (2010). Assessment of five bioaccessibility assays for predicting the efficacy of petroleum hydrocarbon biodegradation in aged contaminated soils. (Elsevier, Ed.) *81*, 1061-1068. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.059>
- [16] Peijnenburg, W. (2020). Implementation of Bioavailability in Prospective and Retrospective Risk Assessment of Chemicals in Soils and Sediments. In J. Ortega-Calvo, *Bioavailability of Organic Chemicals in Soil and Sediment, The Handbook of Environmental Chemistry*. (p. 391-442). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-586-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-90-481-586-5_12)

- [17] Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., & Naidu, R. (2016). Bioaugmentation with Novel Microbial Formula vs. Natural Attenuation of a Long-Term Mixed Contaminated Soil—Treatability Studies in Solid- and Slurry-Phase Microcosms. *Water Air Soil Pollution*, 227:25. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-015-2709-7>
- [18] Tomei, M., & Daugulis, A. (2013). Ex Situ Bioremediation of Contaminated Soils: An Overview of Conventional and Innovative Technologies. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 43, 2107–2139. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.672056>
- [19] PRAS, P. d. (20 de Julio de 2022). *Ministerio del Ambiente y Transición Ecológica del Ecuador*. Obtenido de [http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/737569/Plan+de+Reparaci%C3%B3n+de+Pacayacu+++Final-1+\\_1\\_Ministerio+del+Ambiente+del+Ecuador.+2015.+Acuerdo+Ministerial+097.+Anexos+del+Texto+Unificado+de+Legislaci%C3%B3n+Secundaria+del+Ministerio+del+Ambiente](http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/737569/Plan+de+Reparaci%C3%B3n+de+Pacayacu+++Final-1+_1_Ministerio+del+Ambiente+del+Ecuador.+2015.+Acuerdo+Ministerial+097.+Anexos+del+Texto+Unificado+de+Legislaci%C3%B3n+Secundaria+del+Ministerio+del+Ambiente).
- [20] Mills, A., Breuil, C., & Colwell, R. (1978). Enumeration of petroleum-degrading marine and estuarine microorganisms by the most probable number method. *Can J Microbiol.*, pp. 24, 552–557.
- [21] ISO 10381-6:2009. (2014). Calidad del Suelo, Muestreo. Parte 6: guía para el muestreo, la manipulación y la conservación de suelos en condiciones aerobias, para la evaluación en el laboratorio de procesos, biomasa y diversidad microbiana.
- [22] Environmental Protection Agency. (1996b.). *Soil and Waste pH. Method 9045D*.
- [23] Environmental Protection Agency. (1996a). *Total Recoverable Petroleum Hydrocarbons By Infrared Spectrophotometry. Method 8440*.
- [24] Delille, D., & Coulon, F. (2008). Comparative Mesocosm Study of Biostimulation Efficiency in Two Different Oil-Amended Sub-Antarctic. *Soils. Microb. Ecol.*, 56, 243–252. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9341-z>
- [25] Diplock, E., Mardin, D., Killham, K., & Paton, G. (2009). Predicting bioremediation of hydrocarbons: Laboratory to field scale. *Environ. Pollut.*, 157, 1831–1840. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.01.022>
- [26] Suja, F., Rahim, F., Taha, M., Hambali, N., Razali, M., Khalid, A., & Hamzah, A. (2014). Effects of local microbial bioaugmentation and biostimulation on the bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in crude oil contaminated soil based on laboratory and field observations. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 90, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.006>
- [27] Szulc, A., Ambrozewicz, D., Sydow, M., Lawniczak, L., Piotrowska-Cyplik, A., Marecik, R., & Chrzanowski, L. (2014). The influence of bioaugmentation and biosurfactant addition on bioremediation efficiency of diesel-oil contaminated soil: Feasibility during field studies. *Journal of Environmental Management*, 132, 121-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.006>
- [28] Martínez Álvarez, L. M., Ruberto, L., Gurevich, J., & Mac Cormack, W. (2018). Environmental factors affecting reproducibility of bioremediation field assays in Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102915>
- [29] Clarkson, M. (2015). Bioremediation and Biodegradation of Hydrocarbon Contaminated Soils: A Review. *I.O.S.R. Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 9(11), 38–45.
- [30] Wu, M., Wei, L., Dick, W. A., Ye, X., Chen, K., Kost, D., & Chen, L. (2017). Bioremediation of hydrocarbon degradation in a petroleum-contaminated soil and microbial population and activity determination. *Chemosphere*, 169, 124-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.059>
- [31] Bento, F., Camargo, F., Okeke, B., & Frankenberger, W. (2005). Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation, and bioaugmentation. *Bioresource Technology*, 96(9), 1049-1055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.008>
- [32] Stroud, J. L., Paton, G. I., & Semple, K. T. (2008). Linking chemical extraction to microbial degradation of 14C-hexadecane in soil. *Environmental Pollution*, 156, 474–481. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.018>
- [33] Stroud, J. L., Paton, G. I., & Semple, K. T. (2009). Predicting the biodegradation of target hydrocarbons in the presence of mixed contaminants in soil. *Chemosphere*, pp. 74, 563–567. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.071>
- [34] Juhasz, A., Aleer, S., & Adetutu, E. (2014). Predicting PAH bioremediation efficacy using bioaccessibility assessment tools: Validation of PAH biodegradation e bioaccessibility correlations. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 320-329. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.09.003>



- [35] Rostami, I., & Juhasz, A. (2013). Bioaccessibility-based predictions for estimating PAH biodegradation efficacy- Comparison of model predictions and measured end-points. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 323-330.
- [36] ISO 16751:2020 (2020). Soil quality - Environmental availability of non-polar organic compounds- Determination of the potentially bioavailable fraction and the non-bioavailable fraction using a strong adsorbent of complexing agent.
- [37] Latawiec, A., Swindell, A., Simmons, P., & Reid, B. (2011). Bringing Bioavailability into Contaminated Land Decision Making: The Way Forward?. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 41, 52–77. <http://dx.doi.org/10.1080/00102200802641780>
- [38] Garcia-Villacis, K., Ramos-Guerrero, L., Canga, J. L., Hidalgo-Lasso, D., & Vargas-Jentsch, P. (2021). Environmental Impact Assessment of Remediation Strategy in an Oil Spill in the Ecuadorian Amazon Region. *Pollutants*, 1(4), 234-252. <https://doi.org/10.3390/pollutants1040019>



## Bioeconomía de biocompuestos basados en residuos orgánicos domésticos para la disminución del impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito

Andrea Hernández<sup>1\*</sup>, Marco Rojo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI, México)

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [andrea.hernandez@ambiente.gob.ec](mailto:andrea.hernandez@ambiente.gob.ec)

## Bioeconomy of biocomposite based on domestic organic waste to reduce the environmental impact generated by disposable plastic waste in the Pasaje Amador Building in the city of Quito

### Abstract

Bioeconomy of biocomposite from domestic organic waste is a research project which seeks to lead a transformation from a "linear" paradigm to a "circular" paradigm, through the reevaluation and testing of domestic waste. The main objective was to know the importance and benefit of designing and implementing a bioeconomy model for the design of biocomposite from domestic organic waste in the Pasaje Amador building located in the city of Quito, Ecuador. This seeks to reduce the environmental impact due to the use of plastics. The methodology was naturally mixed and the main investigative sample for the investigation consisted of 15 microenterprises, 10 offices and 10 departments. The investigation consisted of three phases; it began with a data collection phase, by means of a survey, which was used to test the statistical reliability. It was followed by a second experimental phase, where biocomposites were designed from organic waste. In order to do this, 4 experimental tests were carried out, so the results were obtained with confidence, using a non-probabilistic analysis. Within the experimentation, it was considered the intentional manipulation of independent variables, measurement of dependent variables, control, validation and comparison groups. From the experimental phase, 4 biocomposite types were obtained with compositions of 80% starch and 20% cellulose; 80% starch and 20% collagen, 80% starch and 20% polymer waste, 80% starch and 20% chitosan. The best composition for the designed biocomposite was the one corresponding to the composition of 80% starch from domestic organic waste and 20% chitosan. The latter use shrimp waste as a precursor.

Finally, the design was evaluated in a third phase through a bioproduct satisfaction survey. A survey instrument was applied in the Pasaje Amador, making a comparison with single-use plastics, supporting the positive hypothesis of the investigation, which



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
06/06/2022

Aceptado /  
Accepted:  
19/03/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



assumed that this model of Bioeconomy of biocomposites from domestic organic waste, allowed to reduce the environmental impact generated by single-use plastic waste in the Pasaje Amador Building in the city of Quito.

**Keywords:** Bioeconomy, biocomposites, plastic, pollution, environment.

## Resumen

Bioeconomía de biocompuestos basados en residuos orgánicos domésticos es un proyecto de investigación que busca aportar a una transformación de un paradigma "lineal" a un paradigma "circular", mediante la revalorización y aprovechamiento de residuos domésticos. El objetivo principal fue conocer la importancia y beneficio de diseñar e implementar un modelo de bioeconomía circular para el diseño de biocompuestos a partir de residuos orgánicos domésticos en el Edificio Pasaje Amador ubicado en la ciudad de Quito, Ecuador. Con esto se busca reducir el impacto ambiental generado por utilización de plásticos de un solo uso. La metodología fue de naturaleza mixta y la muestra para la investigación consistió de 15 microempresas, 10 oficinas y 10 departamentos. La investigación constó de tres fases; se inició con una fase de recolección de datos mediante un cuestionario, mismo que fue sometido a pruebas estadísticas de confiabilidad. Se continuó con una segunda fase experimental donde se diseñaron los biocompuestos a partir de residuos orgánicos; para esto se realizaron 4 ensayos experimentales, para que así los resultados presenten confiabilidad utilizando un análisis no probabilístico. Dentro de la experimentación se tuvo en cuenta la manipulación intencional de variables independientes, la medición de variables dependientes, control, validez y grupos de comparación. De la fase experimental se obtuvo 4 materiales compuestos con distintas composiciones: 80% de almidón y 20% de celulosa, 80% de almidón y 20% de colágeno, 80% de almidón y 20% de residuos de polímeros y 80% de almidón y 20% de quitosano. La mejor composición para el biocompuesto diseñado fue de 80% de almidón proveniente de residuos orgánicos domésticos y 20% de quitosano, utilizando este último como precursor a los residuos de cáscara de camarón.

El diseño finalmente en su tercera fase fue evaluado mediante un cuestionario de satisfacción del bioproducto. Este instrumento fue aplicado en el Pasaje Amador, logrando una comparación con los plásticos de un solo uso, afirmando así la hipótesis positiva de la investigación, la cual consistió en asumir que el modelo de bioeconomía de biocompuestos a partir de residuos orgánicos domésticos, permite disminuir el impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito.

**Palabras clave:** Bioeconomía, biocompuestos, plástico, contaminación, ambiente.

---

## INTRODUCCIÓN

La bioeconomía se desarrolla como un modelo de economía para avanzar hacia un sistema de desarrollo sostenible que satisfaga las necesidades del presente



sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. En esta se destacan e incorporan varios conceptos complementarios tales como economía verde, la cual busca la reducción de carbono y el aprovechamiento eficiente de recursos naturales, económicos y sociales. Se encuentra también el concepto de economía circular, basado en un sistema de aprovechamiento de recursos de manera racional y eficiente dentro de todo el ciclo de vida de un producto o servicio, minimizando la generación de desperdicios, siendo la vinculación entre la bioeconomía y la economía circular la red de valor basada en la biomasa [1].

Este estudio contempla como desafío la disminución del impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito. La investigación busca aportar a la transformación de un paradigma lineal a un paradigma circular, mediante el aprovechamiento y revaloración de los residuos orgánicos domésticos generados. Esto se logra a través de modelos experimentales de diseño de biomateriales, así como su evaluación y concientización de su uso, para así minimizar el impacto ambiental que han generado los plásticos de un solo uso [2]. Se obtiene beneficios económicos, ambientales y sociales, tornándose en un proyecto integral que estratégicamente plantea soluciones reales a problemáticas ambientales. Para esto se considera que la contaminación por plástico de un solo uso ha causado problemas de salud, daño de ecosistemas marinos y terrestres y afectación a componentes ambientales como el agua, el suelo y el aire [3]. De igual manera los residuos que pueden volver a tener un nuevo uso no son aprovechados económicamente.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal conocer la importancia y beneficio de implementar un modelo de bioeconomía para el diseño de biocompuestos a partir de residuos orgánicos domésticos. Esto es un reto debido a que la estructura industrial con la que cuenta Ecuador es tradicional y existen obstáculos para que los bioprocesos y bioproductos amigables con el medio ambiente se impulsen en el país. Sin embargo, identificar los factores que obstaculizan o que podrían impulsar esta visión, traería beneficios no sólo económicamente sustentables sino también medioambientales que mejorarían la calidad de vida de las personas. De implementar un modelo de bioeconomía en el Ecuador para el diseño de biocompuestos se daría un avance en el desarrollo de un proyecto pionero que pueda replicarse a otros productos y servicios. De igual manera, esto se alinearía a los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo del Ecuador y al cumplimiento de la Agenda Mundial de Desarrollo 2030, con énfasis en los siguientes objetivos:

- Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
- Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.
- Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.



- Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.
- Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.

El estudio aprovecha las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos orgánicos (biomasa) de nuestra área de estudio, a fin de diseñar un modelo piloto en el Pasaje Amador. Este lugar es el primer Centro Comercial de Quito, el cual cuenta con diferentes establecimientos como locales comerciales y viviendas que generan desechos orgánicos que pueden ser utilizados en la producción de bioplásticos o biocompuestos. Debido a que los polímeros o plásticos de un solo uso utilizan como materia prima combustibles fósiles, alrededor del 20% de la producción del petróleo mundial es destinada para la generación de materiales plásticos. A esto se suma la contaminación de la industria hidrocarburífera extractiva, la cual ha impactado ecosistemas por su actividad, así como por derrames e incidentes propios de la actividad [4], dejando un alto impacto ambiental, social y problemas de contaminación de recursos hídricos, suelo, aire, deforestación y otros.

Los componentes químicos y la materia prima de los polímeros o plásticos de origen sintético hacen de este un material de difícil degradación. Se estima de acuerdo con datos de Organización de Naciones Unidas, que el 90% del agua embotellada y 83% de agua de grifo contienen partículas de plástico, comúnmente llamados microplásticos [5], mismos que han generado problemas de salud a nivel respiratorio y digestivo. Los productos de espuma de polietileno contienen sustancias químicas cancerígenas como el estireno y el benceno, que atacan el sistema nervioso. Esto se suma a los problemas ambientales como contaminación de cuerpos de agua dulce, contaminación de ecosistemas marinos, intoxicación y muerte de especies terrestres y marinas, destrucción de flora y de ecosistemas, lo cual agrava los desastres naturales y producen obstrucción de alcantarillas. Esto ocasiona problemas de plagas y un sinnúmero de agravantes que hacen de esta una problemática de orden mundial [6].

En relación con los productos plásticos, mundialmente se consume un millón de bolsas plásticas por minuto, es decir más de quinientos billones al año y los sorbetes plásticos constituyen el cuarto residuo más común que se encuentra en los océanos. Si se uniera el plástico generado y consumido de todo el mundo se podría envolver siete veces al planeta. De acuerdo con cifras de la ONU, el reciclaje del plástico es de un 9%, es decir el 91% restante se dirige a vertederos o al ambiente [7]. De igual manera, el consumo irracional de plástico, con base en la falta o poca concientización de la población mundial, la masiva difusión de productos de origen polimérico sintético, así como el bajo costo de producción y alcance de este material ha hecho del plástico un producto de descarte sin contemplar las consecuencias de contaminación socioambiental [1].



Frente a estos retos, en Ecuador como en otras partes del mundo se fortalecen las iniciativas para cambiar de un paradigma "lineal" a un paradigma "circular". Así se involucra a todos los actores tales como empresas, universidades, gobierno y a la sociedad en general, a fin de desarrollar modelos alineados con los problemas socioambientales. Su implementación se convierte en un reto, pero al mismo tiempo generaría beneficios no sólo económicos sino también ambientales, mejorando y garantizando la calidad de vida y el derecho de la población de vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, como lo establece la Constitución del Ecuador.

Al implementar una biocultura económica en el Ecuador, se contribuiría en los modelos de desarrollo que buscan la conservación, protección y consumo racional de recursos. De igual manera, se fortalece la incorporación del componente ambiental en las diferentes actividades económicas productivas, tanto las de carácter estratégico como no estratégico, construyendo una sociedad consciente de los servicios y bienes que genera y consume.

Esta investigación busca profundizar en el área de conocimiento del ecodiseño de biomateriales, la bioeconomía y la química como herramientas de aplicación. Sin duda, hoy Ecuador requiere de modelos de desarrollo que permitan reducir las brechas de desigualdad social y económica, así como la difusión de conocimiento, innovación, tecnología y ciencia que permita dar solución a los desafíos de nuestra sociedad. La hipótesis positiva de la investigación asume que el modelo de Bioeconomía de biocompuestos a partir de residuos orgánicos domésticos, permite disminuir el impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito.

## METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente estudio es de naturaleza mixta, de carácter cualitativo y cuantitativo. Se trata de una investigación realizada a partir de una justificación epistemológica y lógica, la cual busca sintetizar la parte intelectual y práctica, potenciando e integrando los dos enfoques para responder la pregunta de investigación [8]. Dicha pregunta en este caso es verificar si el modelo basado en la bioeconomía de biocompuestos generados a partir de residuos orgánicos domésticos, permite disminuir el impacto ambiental generado por residuos plásticos de un solo uso en el Edificio Pasaje Amador de la ciudad de Quito.

La población objeto del presente estudio se localiza en el Edificio Pasaje. Se contempla 35 establecimientos divididos en tres estratos los cuales son microempresas, oficinas y departamentos. En el caso de nuestro estudio, la población en la cual se realizó el levantamiento de información consta de quince microempresas, diez oficinas y diez departamentos. Se realizó un muestreo probabilístico considerando que todos los elementos de la población tuvieron la misma posibilidad de ser escogidos. Los elementos no dependieron de un direccionamiento de los criterios específicos de la investigación.

Para efectos del presente estudio, se utilizó el programa InnerSoftSTATS v2,3. Con base en el tamaño de cada estrato de la población de estudio se calculó el tamaño muestral



de cada estrato obteniéndose los resultados con un nivel de confianza del 95%. Se considera también un error máximo del 5%, un porcentaje estimado de 50% para la muestra,  $p = 0,5$ . Se toma en cuenta que la mayoría de las pruebas estadísticas exigen quince casos como mínimo por grupo de comparación [9] y dentro de nuestro grupo de estudios tenemos dos estratos con menos de quince casos.

En el diseño se utilizaron dos tipos de variables: las variables independientes y dependientes [10]. A partir de la propiedad cuantificable de la variable, se seleccionaron los instrumentos de recolección de datos, con el fin de obtener la información empírica necesaria para alcanzar los objetivos propuestos con la investigación y se pueda comprobar la hipótesis formulada. Para nuestra investigación se utilizó las variables cualitativas y cuantitativas, conforme se indica en la tabla 1.

Para fines de la investigación se inició con una fase de recolección de datos, para así diseñar el modelo de bioeconomía, mediante un cuestionario diseñado en base a investigación científica, el cual analizó, operacionalizó, codificó y midió las variables [10]. Una vez tabulados los datos, se obtuvo que el coeficiente de Alfa de Cronbach del cuestionario es de 0,973, determinando que la consistencia interna de la escala utilizada es alta [10].

En la segunda fase de la investigación, se estandarizó un protocolo de obtención de biocompuestos a partir de desechos orgánicos con base en toda la investigación realizada. Se realizó lo mismo con la información sistematizada del primer cuestionario, a través del uso de químicos convencionales que permiten reducir los costos de producción del biocompuesto diseñado, para que sea un material competitivo con relación al plástico de un solo uso.

Se finalizó con una tercera fase que evaluó el biomaterial diseñado, mediante un cuestionario de conformidad del producto, que conto con escalamiento Likert. Este contempló aspectos cualitativos y cuantitativos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y equipos utilizados fueron plancha de calentamiento, balanza analítica, equipo de baño maría, agitadores magnéticos, vasos de precipitación y horno. Los reactivos y químicos utilizados fueron residuos, maíz, cáscaras de frutas, bagazo orgánico de residuos de alimentos crudos o procesados, glicerina, agua destilada, ácido acético 0,1 M, hidróxido de sodio 0,1 M, aditivos naturales como colágeno (gelatina), celulosa (papel reciclado, restos de madera), quitosano (cáscara de camarón y restos de mariscos) y polímero sintético (residuos de polímeros sintéticos), y plastificante natural (Aceite de linaza).

Los residuos orgánicos recibieron un pretratamiento, siendo clasificados en residuos con semillas y residuos de pieles o restos de alimentos. Para ambos grupos se estandarizó el protocolo para la extracción de almidón y humectación del biocompuesto.

Para la extracción de almidón de residuos con semillas se procedió a lavar las semillas con agua destilada y desinfectarlas sumergiéndolas treinta minutos en una solución de ácido acético al 10%. Posteriormente se procedió a secar por 24 horas, para luego



deshidratar el biomaterial durante 16 horas a 150° C. Finalmente se molió las semillas hasta obtener el almidón para su almacenamiento en un espacio sin humedad.

De igual manera para la extracción de almidón de residuos orgánicos y cáscaras de camarón, se procedió a lavar los residuos orgánicos con agua destilada, desinfectarlos en ácido acético preparado y secarlos de manera inmediata por 48 horas. Posteriormente se los llevó al horno durante treinta minutos a 50° C y luego se efectuó un segundo secado durante 40 minutos a 60° C. Finalmente se maceró y molió la biomasa seca, para así almacenar el almidón en un espacio sin humedad.

Para la humectación del biocompuesto, se colocó en un vaso de precipitación 10 g de almidón obtenido por proceso de secado y molienda (5 g derivados de maíz y 5 g derivados de residuos obtenidos de la muestra de estudio), 100 ml de agua destilada, 10 ml de glicerina como plastificante a la mezcla y 15 ml de ácido acético para promover el rompimiento de cadenas de amilopectina. Se procedió a mezclar por 15 minutos en el calentador con agitación constante y se adicionó 2 ml de hidróxido de sodio. Se colocó la mezcla en una bandeja de vidrio engrasado con aceite vegetal o de linaza, dejándolo secar en la estufa a 40°C durante dos horas.

## RESULTADOS

Con los protocolos estandarizados se realizaron 4 ensayos experimentales utilizando los desechos orgánicos del Pasaje Amador bajo un porcentaje de 80% de almidón obtenido de residuos orgánicos y un 20% de aditivos como papel y madera (celulosa), gelatina (colágeno), desechos plásticos (polímeros) y cáscaras de camarón (quitosano). Se sometió todos los ensayos a las mismas condiciones de temperatura, humedad, polimerización y humectación. El mejor resultado de experimentación resultó ser la composición de 80% de almidón con 20% de quitosano. Esto se obtuvo con base en los ensayos mecánicos de resistencia, ensayo de límite plástico y óptico con uso de un microscopio para analizar la porosidad del material.

El ensayo final consistió en mezclar en un vaso de precipitación 8 g de almidón obtenido por proceso de secado y molienda (4 g de almidón derivados de maíz y 4 g de almidón derivados de residuos orgánicos), 2 g de quitosano proveniente de residuos de cáscaras de camarón, 100 ml de agua destilada, 10 ml de glicerina y 15 ml de ácido acético por 15 minutos en el calentador con agitación constante hasta lograr una pasta viscosa. Se adicionó 2 ml de hidróxido de sodio 0,1 molar y se dejó secar en la estufa a 40° C durante 2 horas.

Dentro del modelo diseñado se evaluaron en la muestra de estudio las siguientes variables que permitieron diseñar el biocompuesto. Estas se describen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Variables de diseño de biocompuesto

Variables evaluadas	Criterios de evaluación	Resultados %
Sexo de los encuestados	<b>Masculino</b>	<b>88,6%</b>
	Femenino	11,4%
Edad de los encuestados	Mayor a 41 años	11,4%
	<b>41-50 años</b>	<b>45,7%</b>
	de 51-60 años	28,6%
	Mayor a 61 años	14,3%
Tipo de establecimiento	<b>Microempresas</b>	<b>42,8%</b>
	Oficinas	28,6%
	Departamentos	28,6%
Número de personas que habitan en los establecimientos	<b>1 o 2 personas</b>	<b>68,6%</b>
	3 a 5 personas	14,3%
	6 a 9 personas	11,3%
	10 a 12 personas	2,9%
	Más de 12 personas	2,9%
Nivel de escolaridad	Primaria	5,7
	<b>Secundaria</b>	<b>57,1%</b>
	Tercer Nivel	28,6%
	Cuarto Nivel	8,6%
Residuos que se generan		
Volumen semanal de papel y cartón generado	<b>1 – 4 kg</b>	<b>68,6%</b>
	5 – 9kg	17,1%
	10 – 15 kg	11,4%
	Más de 16 kg	2,9%
Volumen semanal de plástico que se genera	<b>1 – 4 kg</b>	<b>85,7%</b>
	5 – 9 kg	2,9%
	10 – 15 kg	5,7%
Volumen semanal de residuos orgánicos que se generan	Más de 16 kg	5,7%
	No se generan	5,6%
	<b>1 – 4 kg</b>	<b>74,3%</b>
	5 – 9 kilogramos	14,3%
	10 – 15 kg,	2,9%
Más de 16 kg	2,9%	
Clasificación de desechos	No se realiza	100%
Destino final del papel y cartón generado como desechos	<b>Recolección municipal</b>	<b>82,8%</b>
	Reciclaje	8,6%
	Reutilización	8,6%



Variables evaluadas	Criterios de evaluación	Resultados %
Destino final del plástico generado como desecho	<b>Recolección municipal</b>	<b>82,8%</b>
	Sistema de reciclaje	8,6%
	Reutilización	8,6%
Destino final de los residuos orgánicos generados.	<b>Sistema de recolección municipal</b>	<b>82,9%</b>
	Reciclaje	11,4%
Volumen de consumo de plástico por semana	<b>1 – 4 kg</b>	<b>68,6%</b>
	5 – 9 kg	17,1%
	10 – 15 kg	5,7%
	Más de 16 kg	5,7%
	No genera este tipo de desecho	2,9%
'Costo por unidad de funda plástica o botella	<b>0,01 a 0,03 centavos de dólar</b>	<b>68,6%</b>
	0,04 – 0,06 USD	17,1%
	0,07 – 0,09 USD	5,7%
	0,10 – 0,12 USD	5,7%
	Más de 0.13 USD	2,9%
Características de bolsas plásticas para su elección	<b>Fácil descarte</b>	<b>45,7%</b>
	Bajo costo	37,1%
	Duración	5,7%
	Resistencia	5,7%
Características de Botellas plásticas para su elección	<b>Fácil descarte</b>	<b>91,4%</b>
	Bajo costo	8,6%

Nota. Hernández, 2022. Descripción de las variables del estudio realizado en la muestra del estudio.

El biocompuesto obtenido en el ensayo experimental compuesto por 80% almidón y 20% de quitosano fue evaluado mediante un cuestionario con escalamiento Likert [11], para verificar el impacto que tiene la inserción del producto comparado con los plásticos de un solo uso. Así se analizó la calidad y satisfacción del producto para conocer aspectos de percepción del modelo experimental. Estos resultados se describen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Variables para evaluar el biocompuesto diseñado.

Variables evaluadas	Criterios de evaluación	Resultados %
Calidad del biocompuesto	<b>Se adapta y satisface las necesidades de manera parcial</b>	<b>51,45%</b>
	Satisfacción total	31,45%
	Ni de acuerdo ni en desacuerdo.	17,1%



Variables evaluadas	Criterios de evaluación	Resultados %
Resiste y cumple de fines de uso	<b>De acuerdo</b>	<b>37,1%</b>
	Totalmente de acuerdo	34,3%
	Ni de acuerdo ni en desacuerdo.	28,6%
El biocompuesto entregado puede sustituir al plástico de un solo uso que utiliza en sus actividades diarias	Totalmente de acuerdo	22,9%
	De acuerdo.	20%
	<b>Ni de acuerdo ni en desacuerdo</b>	<b>57,1%,</b>
El material cumple la expectativa de utilidad.	<b>Totalmente de acuerdo</b>	<b>42,9%</b>
	<b>De acuerdo</b>	<b>42,9%</b>
	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	14,2%
El bioproducto resulta atractivo visualmente	<b>Totalmente de acuerdo</b>	<b>42,9%</b>
	<b>De acuerdo</b>	<b>42,9%</b>
	Ni de acuerdo ni en desacuerdo.	14,2%
Recomendaría el uso del producto	<b>Totalmente de acuerdo</b>	<b>51,4%</b>
	De acuerdo	34,3%
	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	14,3%
Percepción de que el producto es ecoeficiente y amigable con el ambiente.	<b>Totalmente de acuerdo</b>	<b>62,9%</b>
	No se encuentra de acuerdo	37,1%
Biocompuesto como alternativa para reducir contaminación	<b>De acuerdo</b>	<b>54,3%</b>
	Totalmente de acuerdo	17,1%
	No estar de acuerdo ni en desacuerdo	28,6%
Interés de participar en alternativas y proyectos que reduzcan la contaminación ambiental	<b>Ni de acuerdo ni en desacuerdo</b>	<b>57,1%</b>
	Totalmente de acuerdo	5,7%
	De acuerdo	34,3%
	No está de acuerdo	2,9%
Canal de comunicación para iniciativas de producción de biocompuestos	<b>Facebook</b>	<b>82,9%</b>
	Página web	11,4%
	Instagram	5,7%

Nota. Hernández, 2022.

Finalmente el modelo de diseño de bioeconomía de biocompuestos fue publicado como parte del Programa de Estudios del Instituto de Educación y Formación Continua CIP GLOBAL Ecuador <https://cip-lex.com/>, mismo que puede accederse en el link: <https://drive.google.com/drive/folders/1D94-MgMpuZ40ds7b73gLIeYzFSByq0N?usp=sharing>

## ANÁLISIS

Formular un modelo basado en la bioeconomía de biocompuestos a partir de residuos orgánicos domésticos en el Pasaje Amador permitió la aplicación de principios tales como la producción de bioproductos ecoeficientes, producción sostenible, revalorización de



residuos y aprovechamiento de biomasa dentro de una economía local formada por microempresas, oficinas y departamentos. Sobre estos en función al tipo y al número de habitantes existentes, se estableció el volumen de generación de desechos por tipo, sistemas de clasificación, tipo de desechos generados por establecimiento e impacto ambiental, lo que permite evaluar los detalles de generación de residuos orgánicos para su aprovechamiento como biomasa a fin de obtener un biocompuesto experimental.

Se considera que en la muestra de estudio no existe una clasificación y aprovechamiento de residuos, lo que se contrasta con un alto consumo de plástico de un solo uso que por su versatilidad y bajo costo, es parte de las actividades diarias. De igual manera en el análisis de la población se determina la poca o nula información en modelos de bioeconomía, así como desconocimiento por parte de la muestra de estudio de alternativas que permitan reducir la contaminación por plástico de un solo uso así como del aprovechamiento de los residuos que se generan.

La evaluación y validación experimental del biocompuesto diseñado se realizó mediante ensayos de resistencia, plasticidad y porosidad, así como mediante el uso de un cuestionario de conformidad del producto. Se determinó que el biocompuesto diseñado es un material plástico resistente de baja porosidad, apto para los fines de la muestra de estudio. Sin embargo se debe fortalecer el concepto con una difusión del biomaterial a fin de que gane credibilidad en los usuarios, en relación con la premisa de que el biocompuesto diseñado puede sustituir al plástico de un solo uso que se utiliza en las actividades diarias. El 42,9% de la muestra señala su opinión favorable, por lo que se debe trabajar en la difusión de los beneficios del material, así como en la expectativa del producto, campañas de marketing, comunicación usando redes sociales de alto impacto, difusión y branding. Así se afianza en los usuarios el consumo de un biocompuesto en base a sus principios y a sus beneficios.

## DISCUSIÓN

La implementación de un modelo de bioeconomía en el Pasaje Amador nos permite determinar que estos modelos deben desarrollarse como parte de economías locales y territoriales [12]. Para el efecto es necesario reconocer el derecho que tiene la sociedad a estar informada y capacitada, para así fortalecer los procesos de producción y consumo sostenible, tales como la valorización y aprovechamiento de los residuos orgánicos que fueron objeto del presente trabajo [13].

De la investigación se establece la necesidad de una inversión en investigación científica y tecnológica a fin de resolver problemáticas de carácter ambiental, social y económico [14]. Estos problemas fueron ahondados por la pandemia de Covid-19, por razones como el aumento del uso de plástico y de otros materiales descartables como mascarillas y cubiertos que elevan la generación de residuos y por ende del impacto ambiental.

En Ecuador se deben desarrollar políticas públicas nacionales y provinciales que permitan afianzar los modelos de bioeconomía que contemplen el ciclo de vida de los productos que aprovechen los recursos durante todas sus etapas. Esto se realiza bajo principios de protección, conservación y prevención de los impactos ambientales,



enfocado en reciclaje a nivel domiciliario Así mismo es necesario el desarrollo sostenible del territorio, el diseño de bioproductos y servicios y la gestión de residuos con la siguiente jerarquización y prevención: minimización de la generación en la fuente, aprovechamiento o valorización, eliminación y disposición final, adopción de modelos circulares con la finalidad de generar ingresos, crear fuentes de empleo, fortalecer la conservación biológica, y aprovechar responsablemente de la biodiversidad. Todo esto a fin de garantizar el derecho humano de vivir en un ambiente sano, garantizando sostenibilidad. Para ello las líneas de continuidad deben centrarse en el desarrollo de biocompuestos y otro tipo de biomateriales ecoeficientes competitivos, principalmente en base a su costo en el mercado. El sector público debe promover la elaboración, aplicación y control de políticas e iniciativas públicas, así como el sector privado debe promover el desarrollo de proyectos y tecnologías innovadoras [15].

Del estudio realizado se determina la nula clasificación de desechos en la muestra de estudio y por ende en el Ecuador. Para el efecto se deberán implementar modelos de bioeconomía circular en las empresas y municipalidades con la finalidad de aprovechar los residuos, evitando que los mismos sean dispuestos sin aprovechamiento previo. Se deben considerar sus propiedades para obtener materia prima para el diseño de biocompuestos y otros materiales que se pueden generar a través de procesos de reciclaje, procesamiento, reúso, recuperación y otras técnicas de aprovechamiento de residuos [16].

Dentro de los modelos de bioeconomía, se deben contemplar en el desarrollo biotecnológico la bioética que permita que sobre cualquier diseño de aprovechamiento de recursos naturales, que se garantice la seguridad alimentaria, el buen vivir y el aprovechamiento sostenible y sustentable de recursos. Estos son aspectos éticos que permiten el desarrollo de modelos de bioeconomía que mantengan en equilibrio las variables ambiente, sociedad y economía. Se afianza en el desarrollo post pandemia, que sin duda alguna busca el crecimiento local de nuestras comunidades con un enfoque de conservación y aprovechamiento racional de recursos. Es importante establecer que los modelos de bioeconomía y desarrollo de biotecnología deben hacerse bajo normativas legales de acuerdo con el país donde estos se desarrollen, contemplando de manera fundamentada los derechos de propiedad intelectual, patentes y la accesibilidad de la tecnología en los países en desarrollo, así como la concientización del público y su aceptación del desarrollo[17].

Considerando que de nuestro estudio se determina el desconocimiento de la población a alternativas con relación al plástico de un solo uso o a modelos de bioeconomía, es necesario la difusión de conocimiento, así como el desarrollo de estrategias de comunicación. Con esto se logra una concientización de la población en general y la sensibilización de todos los actores sociales, a fin de que se logre el empoderamiento de la población y sea esta quien abandere y ejecute proyectos sostenibles con base biológica y sea partícipe de un cambio de la matriz productiva de modelos fósiles a modelos de aprovechamiento de recursos naturales de una manera racional [18].

Finalmente es necesario realizar proyecciones y tendencias de las amenazas principales de los modelos de bioeconomía [19]. Para ello se debe establecer una evaluación de riesgos e impactos de los diseños implementados a escala local e industrial [20]. Esto se realiza con el fin de establecer medidas de control y regulación que garanticen el fin



de los modelos de bioeconomía, el cual es el aprovechamiento de recursos naturales de manera sostenible aprovechando la biotecnología como base del desarrollo de bioproductos y bioservicios, reduciendo la generación de residuos, a fin de garantizar modelos sostenibles [21].

## CONCLUSIONES

La bioeconomía de biocompuestos dentro de esta investigación permitió la concientización de la muestra de estudio a un modelo de economía sostenible para desarrollar biocompuestos. Esto permite que las comunidades locales opten por diseños alternativos que admitan reducir el impacto ambiental del uso de plástico de un solo uso, considerando que en el Ecuador la Gestión de residuos sólidos en los hogares ecuatorianos es nula e insuficiente. Del porcentaje de material reciclado el plástico se recicla con un 33,0 %, seguido de los residuos orgánicos con un 27,0 %, el papel/cartón un 21,4 % y el vidrio 12,7 %. Las provincias con mayor porcentaje de hogares que clasifican sus residuos son Galápagos, Loja y Azuay, siendo una fortaleza esta gran cantidad de biomasa que puede ser aprovechada a escala industrial.

El modelo experimental para diseñar biocompuestos a partir de residuos orgánicos fue estandarizado y mejoró con la incorporación de aditivos de materiales reciclados como celulosa (proveniente de papel reciclado), polímeros sintéticos (desechos inorgánicos), colágeno (gelatina) y quitosano (proveniente de desechos de cáscaras de camarón). El mejor aditivo experimental es el quitosano, ya que mejora la resistencia de los bioplásticos generados cuya composición tiene 80% de almidón de residuos orgánicos y 20% de aditivos de materiales reciclados. Los residuos orgánicos del Pasaje Amador se pueden utilizar como agentes plastificantes de películas de almidón ya que tienen altos contenidos de fibra que ayudan a mejorar las características del bioplástico. Estas son estabilidad térmica, disminución de la absorción de humedad y la recristalización del almidón por la interacción entre la fibra y el almidón termoplástico [22].

La muestra de estudio del Edificio Pasaje Amador estableció su satisfacción con el biocompuesto diseñado, haciendo que la toma de decisiones a futuro involucre un cambio de paradigma donde se valore en sus operaciones el uso de biocompuestos. Es decir, la muestra de estudio entiende la importancia del impacto socio ambiental, la transparencia y trazabilidad de sus materias primas a fin de descartar el uso y consumo de plástico de un solo uso que agrava la contaminación ambiental y que contamina cuerpos de agua, suelo, aire y demás recursos naturales.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de investigaciones jurídicas y sociales CIP LEX –Ecuador y su filial CIP GLOBAL Ecuador, centros de investigación dedicados a la ciencia y desarrollo académico, quienes han apostado al desarrollo de la bioeconomía en sus líneas de investigación, financiamiento y desarrollo, y a la Administración del Edificio pasaje Amador de la ciudad de Quito por permitir implementar un modelo en sus instalaciones.



A la iniciativa científica Bioenvist Ecuador, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador, a la Universidad Iberoamérica de México, quienes contribuyeron con insumos técnicos y científicos para la presente investigación y a la Universidad San Francisco de Quito por permitir difundir los resultados del presente estudio.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

A.J.H. Responsabilidad de la dirección en la planificación de la actividad investigadora y ejecución; Desarrollo and diseño de metodología; obtención de fondos; creación del modelo proceso de investigación; realización de experimentos; redacción; revisión y edición del manuscrito.

MAR. Análisis formal de aplicación de estadísticas, matemáticas para analizar datos de estudio.

## CONFLICTO DE INTERÉS

La autora y coautor declara que no existe ningún conflicto de interés

## REFERENCIAS

- [1] Orejuela, L. (2019). Relación de la economía circular, la tecnología cero desechos, la bioeconomía, la biorrefinería y el desarrollo sostenible y sustentable. *Nawpay Revista técnica tecnológica*, 1 (1), 38- 47. [https://www.researchgate.net/publication/338221895\\_Relacion\\_de\\_la\\_Economia\\_Circular\\_la\\_Tecnologia\\_Cero\\_Desechos\\_la\\_Bioeconomia\\_la\\_Biorrefineria\\_y\\_el\\_Desarrollo\\_Sostenible\\_y\\_Sustentable](https://www.researchgate.net/publication/338221895_Relacion_de_la_Economia_Circular_la_Tecnologia_Cero_Desechos_la_Bioeconomia_la_Biorrefineria_y_el_Desarrollo_Sostenible_y_Sustentable)
- [2] Birner, R. (2018). Bioeconomy Concepts. En I. Lewandowski (Ed.), *Bioeconomy*. Springer, Cham. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8_3)
- [3] Philp, J. (2018). The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers. *New Biotechnology*, 40, 11-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.04.004>
- [4] Borja, F. (2019). Tough and Functional Cross-linked Bioplastics from Sheep Wool Keratin. *Scientific reports*, 9. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51393-5>
- [5] Eibes, P. M., y Gabel, F. (2021). Floating microplastic debris in a rural river in Germany: Distribution, types and potential sources and sinks. *Science of The Total Environment*, 816, 151641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151641>
- [6] Georgescu-Roegen, N. (2017). *Bioeconomía: una nueva mirada a la naturaleza de la actividad económica*. *Revista de economía crítica*, 1(23), 152-168. <https://revistaeconomiacritica.org/index.php/rec/article/view/139>
- [7] Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/06/la-agenda-de-desarrollo-sostenible-necesita-un-impulso-urgente-para-alcanzar-sus-objetivos/>
- [8] Behar, D. (2008). *Introducción a la Metodología de la Investigación*. Editorial Shalom.
- [9] Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill.
- [10] Frías, D. (2019). *Apuntes de consistencia interna de las puntuaciones de un instrumento de medida*. Universidad de Valencia. <https://www.uv.es/friasnav/AlfaCronbach.pdf>
- [11] Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014). *Metodología de la investigación*. Sexta Edición. McGraw-Hill Interamericana.
- [12] Riera, M. (2021). Bioeconomía como modelo de negocio en el Ecuador. *Compendium*. 24(46). <https://www.redalyc.org/journal/880/88067978005/html>
- [13] Lengyel, M. y Zanazzi, L. (2020). *Bioeconomía y desarrollo en la Argentina: oportunidades y decisiones estratégicas*. CIECTI. <http://www.ciecti.org.ar/04-bioeconomia-y-desarrollo-en-la-argentina-opportunidades-y-decisiones-estrategicas/>
- [14] Torres M. y Santos-Ordóñez E. (2020). Ecuador, Modern Biotechnology in Ecuador Development and Legal Framework. En A. Chaurasia D.L. Hawksworth y M. Pessoa de Miranda (Eds.), *GMOs. Topics in Biodiversity and Conservation*, vol 19 (p.533-540). Springer Cham. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53183-6\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53183-6_29)
- [15] Krauss, J.B. y Kuttenkeuler, D. (2018). Intellectual property rights derived from academic research and their role in the modern bioeconomy—A guide for scientists. *New Biotechnology*, 40, 133-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.06.013>
- [16] Rodríguez, A., Mondaini, A. y Hirschfeld, M. (2017). *Bioeconomía en América Latina y el Caribe: Contexto global y regional y perspectivas*. Cepal. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/42427-bioeconomia-america-latina-caribe-contexto-global-regional-perspectivas>
- [17] Consejo Alemán de Bioeconomía – BÖR (2017). *Bioeconomy policies and strategies established by 2017. Diagram prepared by the German Bioeconomy Council (Bioökonomierat – BÖR)*. BÖR. <http://bioekonomierat.de/en/international/>
- [18] Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR. (2018). *Bioeconomy Policy (Part III) Update Report of National Strategies around the World. A report from the German Bioeconomy Council*. BÖR. [http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS\\_2018\\_Bioeconomy-Strategies-around-the\\_World\\_Part-III.pdf](http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Bioeconomy-Strategies-around-the_World_Part-III.pdf)
- [19] Global Bioeconomy Summit – GBS. 2015. (2015). *Conference Report. For a Global Sustainable Bioeconomy*. GBS. <https://gbs2020.net/history-2015/>



- [20] Global Bioeconomy Summit – GBS. 2018. (2018). *Communiqué. Global Bioeconomy Summit 2018 - Innovation in the Global Bioeconomy for Sustainable and Inclusive Transformation and Wellbeing*. GBS. [http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS\\_2018\\_Communique.pdf](http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Communique.pdf)
- [21] MINCYT. (2015). *La bioeconomía en la Argentina: Oportunidades y desafíos*. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina. Temas de discusión en el marco de la Red de Estudios en Bioeconomía del Conicet. <http://www.cursobioeconomia.mincyt.gob.ar/wp-content/uploads/2014/12/TEMAS-DE-DISCUSI%C3%93N-EN-EL-MARCO-DE-LA-RED-DE-ESTUDIOS-EN-BIOECONOM%C3%8DA-DEL-CONICET-ABRIL2015.pdf>
- [22] Shruthy, R., Preetha, R., y Sreejit, V. (2022). Biodegradable nano composite reinforced with cellulose nano fiber from coconut industry waste for replacing synthetic plastic food packaging. *Chemosphere*, 291, 132786. doi: <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132786>



## Reacción al fuego de madera sólida de *Pinus pseudostrobus* y de tableros de madera enlistonados, contrachapados, de fibra de media densidad y de astillas orientadas: Estudio comparativo del tiempo de ignición y de la pérdida de masa

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1\*</sup>, Israel Macedo Alquicira<sup>1</sup>, Ernesto Mendoza González<sup>1</sup>, Gerardo Gallegos León<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

\* Autor de correspondencia / Corresponding Author, e-mail: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

## Reaction to fire of solid wood of *Pinus pseudostrobus* and of slatted boards, plywood, medium-density fiberboards and oriented strand boards: Comparative study of ignition time and mass loss

### Abstract

Wood and wood boards that are part of the structure and/or furniture of buildings, in case of fire, contribute to the spread of fire. The objective of the research was to determine the ignition time and mass loss based on indicative fire reaction tests on *Pinus pseudostrobus* specimens, slatted boards, plywood, medium density fiberboard and oriented strand boards. 35 small specimens of each material were prepared and their moisture content and density were calculated. Fire reaction tests were carried out and the ignition time and mass loss were determined. Density increases in the following order: slatted boards, plywood, *P. pseudostrobus*, medium density fiberboard, and oriented strand board. It was concluded that comparatively, the ignition time of the slatted and medium density are similar and the shortest; the time corresponding to plywood is close to that of *P. pseudostrobus* wood; and the ignition time of oriented chip board is the longest. The mass loss of *P. pseudostrobus* wood is lower compared to that of plywood and oriented chip boards. The mass loss of medium density fiberboard and slatted boards is higher and similar to each other. For the four wooden boards studied, as their ignition time increases, their mass loss decreases.

**Keywords:** wood combustion, wooden buildings, wooden furniture, fire, moisture content, density.

### Resumen

La madera y los tableros de madera que forman parte de la estructura y/o mobiliario de edificaciones, en caso de incendio, contribuyen a la expansión del fuego. El objetivo de la investigación fue determinar el tiempo de ignición y la pérdida de masa basado en ensayos indicativos de reacción al fuego en probetas de *Pinus pseudostrobus*, tableros enlistonados, contrachapados, de media densidad y de astillas orientadas. Se



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
25/10/2022

Aceptado /  
Accepted:  
27/03/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



prepararon 35 probetas de pequeñas dimensiones de cada material y se calculó su contenido de humedad y su densidad. Se realizaron pruebas de reacción al fuego y se determinó el tiempo de ignición y la pérdida de masa. La densidad aumenta en el orden siguiente: tableros enlistonados, tableros contrachapados, *P. pseudostrobus*, tableros de media densidad y tableros de astillas orientadas. Se concluye que comparativamente, el tiempo de ignición de los enlistonados y de media densidad son similares y los más cortos; el tiempo correspondiente a los contrachapados es cercano al de la madera de *P. pseudostrobus*; y el tiempo de ignición de los tableros de astillas orientadas es el más largo. La pérdida de masa de la madera de *P. pseudostrobus* es menor comparativamente con la de los tableros contrachapados y de astillas orientadas. La pérdida de masa de los tableros de fibra de media densidad y enlistonados es mayor y similar entre sí. Para los cuatro tableros de madera estudiados, a medida que su tiempo de ignición aumenta, su pérdida de masa disminuye.

**Palabras clave:** combustión de la madera, edificaciones de madera, mobiliario de madera, incendio, contenido de humedad, densidad.

---

## INTRODUCCIÓN

La madera y los tableros de madera forman parte de la estructura y/o mobiliario de edificaciones y, en caso de incendio, contribuyen a la expansión del fuego. No obstante, mediante la aplicación de sustancias que reducen la ignición es posible mejorar el comportamiento al fuego de la madera [1].

La combustibilidad de la madera es una de las principales razones por la que los reglamentos de construcción restringen su uso como material de construcción. Actualmente, los sistemas de detección de humo y rociadores de agua, así como los equipos contra incendios, permiten el uso seguro de la madera en un amplio campo de aplicaciones [2]. La reacción al fuego de un material hace referencia a su respuesta a un ataque inicial de fuego e incluye propiedades como la propagación de la llama, la tasa de liberación de calor y la producción de humo [3]. Estas características son relevantes al inicio del desarrollo de un incendio que es la etapa en la que los productos combustibles pueden contribuir a su propagación.

La determinación de las características de reacción al fuego de madera y de productos derivados está regida por la normalización [4]. Las principales características a determinar son: tasa de liberación de calor, índices de oxígeno límite, de inflamabilidad y de estabilidad térmica, toxicidad, propagación de la llama, tiempo de ignición y pérdida de masa [5].

El tiempo de ignición de la madera es el lapso requerido para establecer la flama sostenida en la superficie de una muestra expuesta a un flujo de calor incidente. Mientras más largo es el tiempo de ignición de un material, es menos inflamable [4,6]. Por su parte, la pérdida de masa se considera como un criterio de ignición de la madera, ya que revela la cantidad de productos gaseosos durante la pirólisis. Si una pieza de madera pierde poca masa al inicio de estar expuesta al fuego, esto indica que esta especie es resistente al fuego [7,8].



La madera sólida de *Pinus pseudostrabus* y los tableros enlistonados, contrachapados, de fibra de media densidad y de astillas orientadas son ampliamente utilizados en la industria del mueble [9,10] y de la construcción [11-13]. Estos materiales pueden constituirse como combustible en condiciones de incendio. De tal forma, que para utilizarlos de manera segura es necesario caracterizar experimentalmente su comportamiento al contacto con el fuego [14-16].

Las características tecnológicas y aplicaciones industriales de estos materiales están publicadas en la guía para la madera de ingeniería [17] y en el manual de la madera [18]. El comportamiento de la madera sólida ante el fuego está reportado en [19,20]. Igualmente, existe información sobre la resistencia y/o la reacción al fuego de elementos estructurales de madera [21,22] y los compuestos de madera-plástico [23,24]. La caracterización del comportamiento al fuego de tableros de madera está documentada por [5, 25].

La literatura reporta principalmente dos clases de pruebas de reacción al fuego: las de descomposición térmica y las de calorimetría [4]. Otros autores configuran pruebas adaptadas a sus objetivos de investigación [21,26]. De tal forma que los corolarios son particulares a cada material y diseño experimental, haciendo difícil la generalización de indicadores o criterios para la comparación de resultados. Igualmente, en la literatura están publicados datos empíricos de pruebas de caracterización, reacción y resistencia al fuego de tableros de madera [14,27,28].

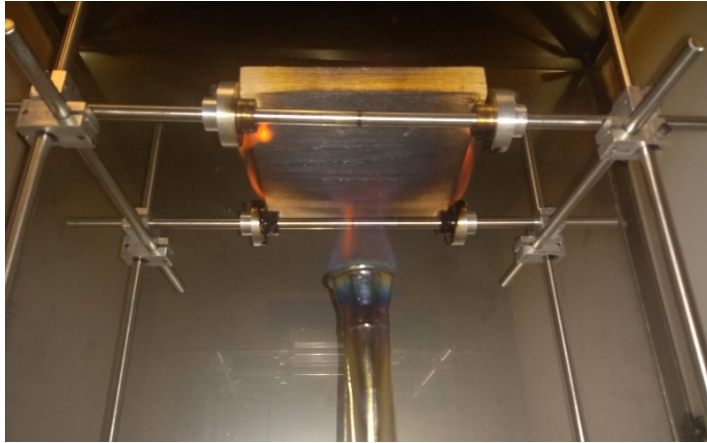
Con todo, la revisión bibliográfica no identificó estudios comparativos que proporcionen tiempos de ignición y porcentajes de pérdida de masa. El objetivo de la investigación fue determinar el tiempo de ignición y la pérdida de masa en pruebas de reacción al fuego en probetas de *P. pseudostrabus*, tableros enlistonados, contrachapados, de media densidad y de astillas orientadas. Para lograr el carácter comparativo de la investigación se realizaron las pruebas en las mismas condiciones de ensayo y se procuró minimizar la variación de factores que alteraran los resultados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se adquirieron piezas de madera aserrada de *Pinus pseudostrabus* (pino) y tableros enlistonados (TE), contrachapados (TC), de media densidad (TMD) y de astillas orientadas (TAO) y se prepararon 35 probetas de cada tipo de material con dimensiones 150 mm de ancho x 150 mm de largo. El espesor de las probetas de *P. pseudostrabus* fue de 20 mm, el de los tableros enlistonados de 17,5 mm, el de los contrachapados y de fibras de media densidad fue de 18 mm y el de los tableros de astillas orientadas fue de 16 mm. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65 % hasta que su peso fue constante. El contenido de humedad de las probetas se evaluó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en estado anhidro [12]. La densidad se determinó con la relación del peso/volumen de las probetas [12].

Los factores experimentales que afectan el tiempo de ignición y la pérdida de peso de los tableros de madera son: el espesor y la densidad del material del tablero, la densidad de flujo de calor radiante y la distancia de los tableros a la fuente de calor radiante [29]. En

este sentido, se controló la variación del espesor de las probetas, así como el flujo de calor empleando un mechero de laboratorio con una distancia de 90 mm de altura entre la boca del mechero y la superficie de contacto de la flama con las probetas (Fig. 1).



**Figura 1.** Pruebas de reacción al fuego. Probeta de tablero de fibra de media densidad

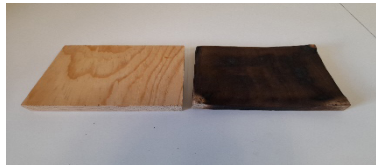
Las pruebas de reacción al fuego consistieron en exponer durante cinco minutos una cara de las probetas a una flama de un mechero con regulación de aire y de gas, quemador de 30 mm de diámetro y temperatura máxima de 1300 °C (Fig. 1). Se midió el tiempo necesario para que tres superficies de la probeta mostraran una flama durante al menos cinco segundos y se definió como el tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ). La pérdida de masa de la probeta ( $\Delta m$ ) se calculó con la proporción entre su peso inicial antes de su exposición al fuego y su peso final después de cinco minutos de exposición [26].

### Diseño experimental

Las variables de repuesta fueron el tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ) y la pérdida de masa ( $\Delta m$ ) medidos en los cinco tipos de material (pino, TE, TC, TMD, TAO). La densidad ( $\rho_{CH}$ ) y el contenido de humedad (CH) fueron variables de referencia. Se calcularon la media ( $\mu$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV). Se realizaron pruebas de normalización de la distribución de los datos con el criterio de demarcación de aceptar una distribución normal si el sesgo estandarizado (SE) y el apuntamiento estandarizado (AE) resultaban al interior del intervalo  $[-2 < SE, AE < +2]$ . Se realizaron pruebas de verificación de varianza de Levene para evaluar la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de los cinco niveles (tipos de material) son iguales. El criterio de demarcación fue considerar un valor  $P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$ , para considerar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95 % de confianza. Los resultados de las pruebas de normalidad y de Levene condujeron a la realización de pruebas de Kruskal-Wallis (K-W) para comparar las medianas en lugar de las medias.

## RESULTADOS

El periodo de tiempo de exposición al fuego (de cinco minutos) fue suficiente para alcanzar el tiempo de ignición de las probetas de los cinco materiales. Igualmente, el tiempo de exposición fue adecuado para provocar la combustión de los materiales y provocar una pérdida de masa. La Fig. 2 muestra el antes y el después de las pruebas de reacción al fuego tanto de las probetas de pino como las de los tableros. Las probetas se carbonizaron principalmente en la cara expuesta a la flama. Su forma plana se contrajo y se curvó de manera cóncava respecto a la exposición de la flama.



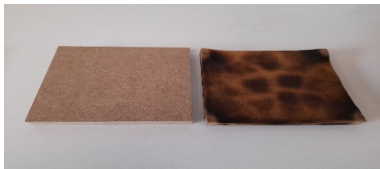
Pino (*Pinus pseudostrabus*)



TE (Tableros enlistonados)



TC (Tableros contrachapados)



TMD (Tableros de media densidad)



TAO (Tableros de astillas orientadas)

**Figura 2.** Probetas de pino y de tableros antes y después de las pruebas de reacción al fuego

Los resultados de las pruebas estadísticas muestran distribuciones normales de los datos del tiempo de ignición y de la pérdida de masa (Tabla 1). Caso diferente es el sesgo estandarizado del tiempo de ignición de los tableros de astillas orientadas, el cual se sitúa fuera del rango requerido por el criterio de demarcación [-2 a +2]. Este resultado indica la no normalidad significativa en los datos, lo cual viola el supuesto de que provienen de distribuciones normales. Asimismo, las pruebas de verificación de varianza mostraron que el valor  $P_{(\alpha=0,05)}$  es menor que 0,05, lo que implica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95 % de confianza. Estos resultados contravienen al supuesto de que las desviaciones estándar son iguales. En consecuencia, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis (K-W) para comparar las medianas en lugar de las medias.

**Tabla 1.** Resultados de las pruebas estadísticas

Material	SE	AE	Levene	K-W
	[-2, +2]	[-2, +2]	$P_{(\alpha=0,05)}$	$P_{(\alpha=0,05)}$
<b>Tiempo de ignición (<math>t_{ign}</math>)</b>				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,201	-1,082	< 0,001*	< 0,001*
Tableros enlistonados	-1,034	1,395		
Tableros contrachapados	0,891	-1,239		
Tableros de media densidad	0,618	-0,342		
Tableros de astillas orientadas	2,658	1,174		
<b>Pérdida de masa (<math>\Delta m</math>)</b>				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,556	-0,649	< 0,001*	< 0,001*
Tableros enlistonados	-1,683	-0,465		
Tableros contrachapados	0,119	-0,027		
Tableros de media densidad	-1,261	-1,363		
Tableros de astillas orientadas	0,683	0,514		

SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Levene = Prueba de verificación de varianza; K-W = Prueba de comparación de medianas de Kruskal-Wallis;  $t_{ign}$  = Tiempo de ignición en segundos;  $\Delta m$  = Pérdida de masa en porcentaje; \* $P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$ : Existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95 % de confianza.

El contenido de humedad de los materiales varía entre 10 % y 12 % y sus coeficientes de variación van de 3,6 % a 8,1 % (Tabla 2). Estos datos indican que el *P. pseudostrobus* y los tableros se estabilizaron al contenido de humedad en equilibrio, de tal forma que este parámetro no influyó en los resultados. La densidad aumenta en el orden siguiente: tableros enlistonados, tableros contrachapados, *P. pseudostrobus*, tableros de media densidad y tableros de astillas orientadas (Tabla 2).

**Tabla 2.** Contenido de humedad, densidad, tiempo de ignición y pérdida de masa de madera de *Pinus pseudostrobus* y de tableros de madera

	CH	$\rho_{CH}$	$t_{ign}$	$\Delta m$
	(%)	( $kg\ m^{-3}$ )	(s)	(%)
<i>Pinus pseudostrobus</i>				
$\mu$	11	528	112	19
$\sigma$	0,62	40	12	2,2
CV	(5,7)	(7,5)	(10,9)	(11,7)
Tableros enlistonados				
$\mu$	12	319	58	33
$\sigma$	0,84	37	3	6,2
CV	(7,2)	(11,6)	(4,8)	(19,1)

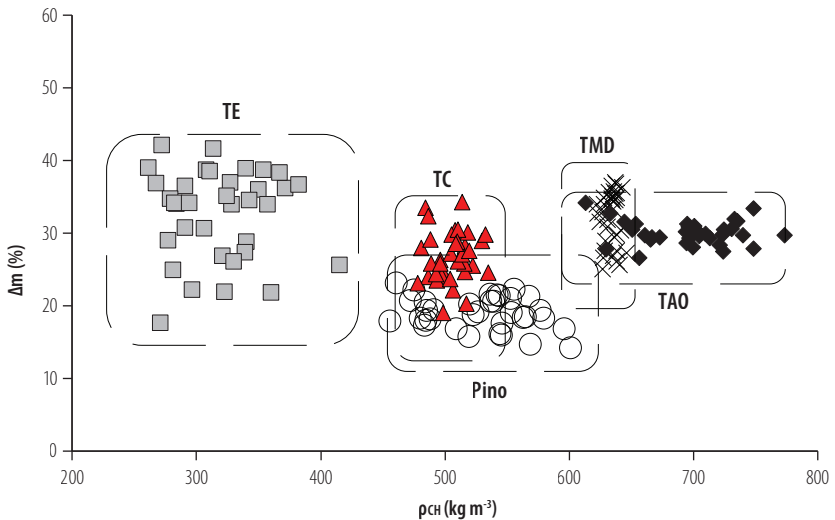


	CH	$\rho_{CH}$	$t_{ign}$	$\Delta m$
	(%)	( $kg\ m^{-3}$ )	(s)	(%)
Tableros contrachapados				
$\mu$	11	505	112	27
$\sigma$	0,62	15	5	3,5
CV	(5,4)	(2,9)	(4,1)	(12,9)
Tableros de media densidad				
$\mu$	10	634	83	32
$\sigma$	0,37	6	4	3,7
CV	(3,6)	(0,9)	(4,4)	(11,6)
Tableros de astillas orientadas				
$\mu$	10	696	122	30
$\sigma$	0,84	38	6	1,6
CV	(8,1)	(5,4)	(4,9)	(5,4)

CH = Contenido de humedad;  $\rho_{CH}$  = Densidad;  $t_{ign}$  = Tiempo de ignición;  $\Delta m$ : Pérdida de masa;  $\mu$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis.

Para la madera sólida, el tiempo de ignición aumenta con la densidad de la madera [30]. Sin embargo, no es el caso para los tableros de madera: el tiempo de ignición de los enlistonados y de media densidad son similares y los más cortos; el tiempo correspondiente a los contrachapados es cercano al de la madera de *P. pseudostrabus*; y el tiempo de ignición de los tableros de astillas orientadas es el más largo. Comparativamente a la madera sólida de *P. pseudostrabus*, los tableros enlistonados y de media densidad se encienden más rápido, los contrachapados se encienden en un tiempo similar y los tableros de astillas orientadas tardan más en encenderse (Tabla 2).

La pérdida de masa de la madera de *P. pseudostrabus* es menor comparativamente con la de los tableros contrachapados y de astillas orientadas (Tabla 2) y la pérdida de masa de los tableros de fibra de media densidad y enlistonados es mayor y similar entre sí. El coeficiente de variación es mayor para los tableros enlistonados y mínimo para los de astillas orientadas. Así, los datos de la pérdida de masa se agrupan de acuerdo al tipo de material (Fig. 3). De tal forma, que la correlación del tiempo de ignición en función de la densidad es nula ( $\Delta m = -0,002 \rho_{CH} + 29,4$  con  $R^2 < 0,01$ ).

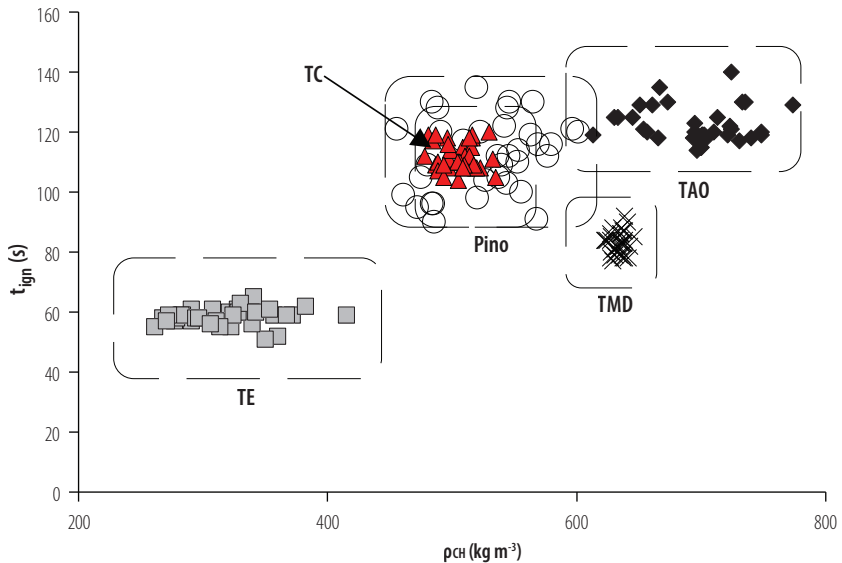


**Figura 3.** Dispersión de la pérdida de masa ( $\Delta m$ ): Pino = *P. pseudostrabus*; TM = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TMD = Tableros de media densidad; TAO = Tableros de astillas orientadas

## DISCUSIÓN

El coeficiente de variación del tiempo de ignición de *Pinus pseudostrabus* es mayor 60 % en promedio con respecto a los cuatro tipos de tableros. Sin embargo, son del mismo orden de los coeficientes de variabilidad del tiempo de ignición reportados por Sotomayor y Ávila [31]: para *Spathodea campanulata* (Tulipán africano) 36 %, para *Fraxinus americana* (Fresno blanco) 14 % y para *Albizia plurijuga* (Tepehuaje) 16 %. Los datos del tiempo de ignición de todas las probetas se agrupan de acuerdo al tipo de material en cuestión (Fig. 4). De tal forma, que la correlación del tiempo de ignición en función de la densidad es baja ( $t_{ign} = 0,121 \rho_{CH} + 32,8$  con  $R^2 = 0,43$ ). Estos resultados sugieren que los tableros de madera disminuyen la variabilidad de la madera para encenderse lo cual resulta en una mejora tecnológica, particularmente los tableros contrachapados y los de astillas orientadas que tienen tiempos de ignición similares a los de la madera sólida, pero con variaciones menores.





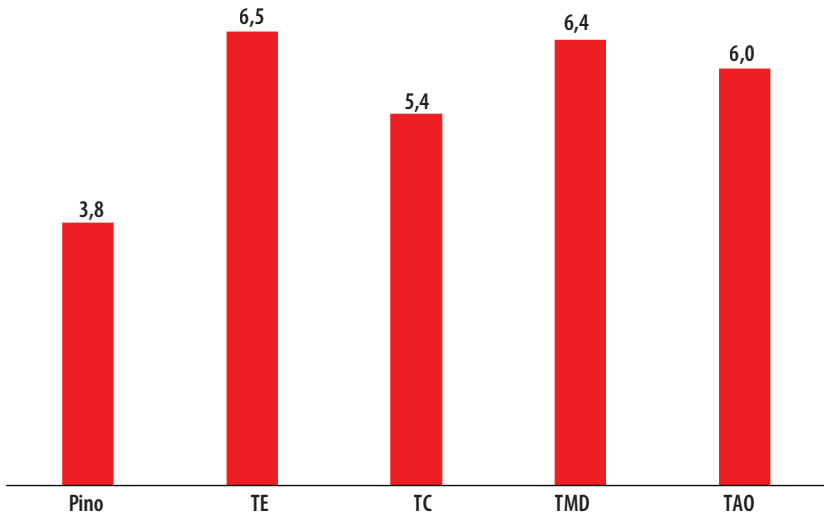
**Figura 4.** Dispersión del tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ): Pino = *P. pseudostrobus*; TM = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TMD = Tableros de media densidad; TAO = Tableros de astillas orientadas

La composición química de la madera sólida de *P. pseudostrobus* está constituida por la matriz ligno-celulósica. Su estructura anatómica está conformada principalmente por traqueidas, de diferentes espesores y lúmenes, agrupadas en capas de crecimiento.

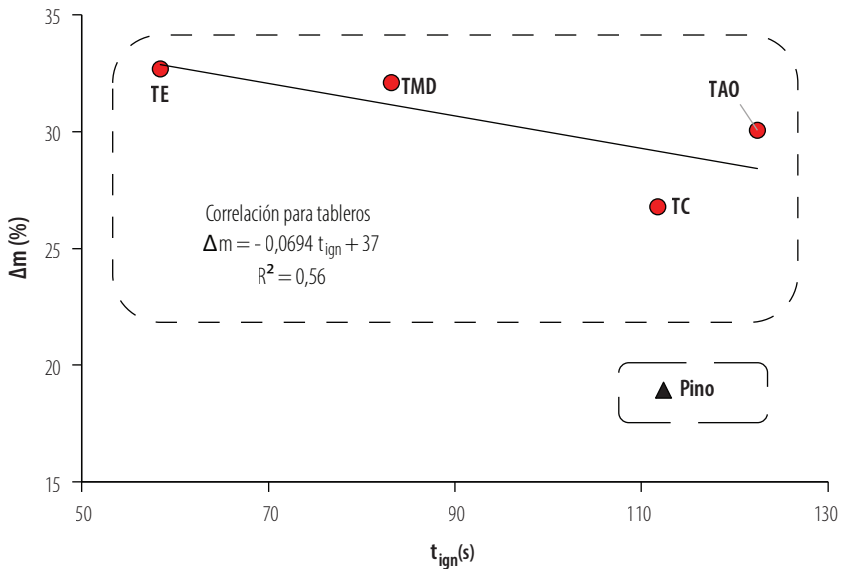
Esta composición y estructura básica se reproducen en los tableros de madera, pero su configuración original se modifica en un material de madera reconstituida en el que varía el tamaño y acomodo de sus componentes, los cuales están aglutinados por un adhesivo incorporado [32-34].

Los tableros enlistonados están compuestos por paralelepípedos de madera sólida cubiertos por una delgada placa también de madera; todos pegados con un adhesivo artificial; mientras que los tableros contrachapados están formados por capas delgadas de madera y acomodadas de forma ortogonal e igualmente aglutinadas con pegamento artificial. Por su parte, los tableros de media densidad están formados por fibras de madera aglomeradas con un adhesivo agregado y, finalmente, los tableros de astillas orientadas son similares a los de media densidad, pero en este caso el tamaño de partículas es el de astillas de madera. De tal forma que, en ausencia de un agente protector y en las mismas condiciones de exposición al fuego, las diferencias en el tiempo de ignición y en la pérdida de masa de los tableros son atribuibles a las distintas configuraciones en la estructura y el acomodo de cada uno de sus componentes.

Dado que en las pruebas el tiempo de exposición es fijo (cinco minutos), la velocidad de la pérdida de masa se puede estimar a partir de la pérdida de masa. Los cuatro tipos de tableros pierden más rápidamente masa que la madera de *P. pseudostrobus* (Fig. 5). Además, se observa una correlación de intensidad media ( $R^2 = 0,56$ ) en la disminución de la pérdida de masa a medida que el tiempo de ignición de los tableros aumenta (Fig. 6).



**Figura 5.** Velocidad de pérdida de masa (% s<sup>-1</sup>). Pino = *P. pseudostrobus*; TM = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TMD = Tableros de media densidad; TAO = Tableros de astillas orientadas



**Figura 6.** Correlación de la pérdida de masa ( $\Delta$ ) en función del tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ) de los tableros y su comparativo con la pérdida de masa de la madera sólida de *P. pseudostrobus* (Pino). TM = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TMD = Tableros de media densidad; TAO = Tableros de astillas orientadas



## CONCLUSIONES

La investigación determinó el tiempo de ignición y la pérdida de masa de madera sólida de *Pinus pseudostrabus* y de tableros enlistonados, contrachapados, de fibra de media densidad y de astillas orientadas.

El tiempo de ignición de la madera sólida de *P. pseudostrabus* es mayor que el de los tableros y no aumenta proporcionalmente con su densidad. En sentido diferente, la pérdida de masa de *P. pseudostrabus* es menor que la de los tableros y no disminuye a medida que su densidad se incrementa. En consecuencia, comparativamente con los tableros, la madera sólida de *P. pseudostrabus* reacciona mejor al fuego.

Para los cuatro tableros de madera estudiados, a medida que su tiempo de ignición aumenta, su pérdida de masa disminuye. De tal forma que, respecto a su reacción al fuego, estos dos parámetros son indicadores de la calidad de un tablero.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores participaron de igual manera en la concepción de la investigación, en la adquisición y análisis de datos y en la redacción del manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Grexa, O. y Lübke, H. (2001). Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter. *Polymer Degradation and Stability*, 74(3), 427–432. doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00181-1)
- [2] Östman, B. A. L. (2017). Fire performance of wood products and timber structures. *International Wood Products Journal*, 8(2), 74–79. doi: <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1320851>
- [3] Chorlton, B. y Gales, J. (2019). Fire performance of cultural heritage and contemporary timbers. *Engineering Structures*, 201, 109739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109739>
- [4] Lowden L. A. y Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, 2, 4. doi: <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>
- [5] Popescu, C. M. y Pfriem, A. (2020). Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview. *Fire and Materials*, 44(1), 100–111. doi: <https://doi.org/10.1002/fam.2779>
- [6] Kuznetsov, V. T. y Fil'kov, A. I. (2011). Ignition of Various Wood Species by Radiant Energy. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 47(1), 65–69. doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508211010096>
- [7] Emberley, R., Do, T., Yim, J. y Torero, J. L. (2017). Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber. *Fire Safety Journal*, 91, 252–258. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.008>
- [8] Zhaia, C., Gong, J., Zhou, X., Peng, F. y Yang, L. (2017). Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under time-dependent heat flux. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 125, 100–108. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.04.013>
- [9] Rebollar, M., Pérez, R. y Vidal, R. (2007). Comparison between oriented strand boards and other wood-based panels for the manufacture of furniture. *Materials and Design*, 28(3), 882–888. doi: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.10.012>
- [10] Ye, H., Wang, Y., Yu, Q., Ge, S., Fan, W., Zhang, M., Huang, Z., Manzo, M., Cai, L., Wang, L. y Xia, C. (2022). Bio-based composites fabricated from wood fibers through self-bonding technology. *Chemosphere*, 287, 132436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132436>
- [11] Aicher, A., Reinhardt, H. W. y Garrecht, H. (Eds.) (2014). *Materials and Joints in Timber Structures*. Dordrecht: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5>
- [12] Borgström, E. (2016). *Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volume 1*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Swedish Wood. Recuperado de: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-1-2016.pdf>
- [13] Jacob, M., Harrington, J. y Robinson, B. (2018). *The Structural Use of Timber - Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. Dublin: COFORD, Department of Agriculture, Food and the Marine. Recuperado de: <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/TimberHandbook5Part130418.pdf>
- [14] Osvaldova, L. M., Markert, F. y Zelinka, S. L. (Eds.). (2020). *Wood & Fire Safety*. Cham: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7>
- [15] Fu, F. (2021). *Fire Safety Design for Tall Buildings*. Florida: CRC Press.
- [16] Aseeva, R., Serkov, B. y Sivenkov, A. (2014). *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. Dordrecht: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7460-5>
- [17] The Engineered Wood Association. (2019). *Engineered Wood. Construction Guide*. Tacoma: APA-The Engineered Wood Association. Recuperado de: <https://www.apawood.org/>
- [18] Forest Products Laboratory. (2021). *Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Recuperado de: [https://www.fpl.fs.fed.us/docmnts/fplgtr/fplgtr282/fpl\\_gtr282.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/docmnts/fplgtr/fplgtr282/fpl_gtr282.pdf)
- [19] Ali, S., Hussain, S. S. y Tohir, M. Z. M. (2019). Fire Test and Effects of Fire Retardant on the Natural Ability of Timber: A Review. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 27(2), 867–895. Recuperado de: [http://www.pertanika2.upm.edu.my/resources/files/Pertanika%20PAPERS/JST%20Vol.%2027%20\(2\)%20Apr.%202019/21.%20JST%201210-2018.pdf](http://www.pertanika2.upm.edu.my/resources/files/Pertanika%20PAPERS/JST%20Vol.%2027%20(2)%20Apr.%202019/21.%20JST%201210-2018.pdf)
- [20] Bartlett, A. I., Hadden, R. M. y Bisby, L. A. (2018). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology*, 55, 1–49. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>



- [21] Schmid, J., Klippel, M., Just, A., y Frangi, A. (2014). Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. *Fire Safety Journal*, 68, 81–99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.006>
- [22] Östman, B., Brandon, D. y Frantzich, H. (2017). Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*, 91, 11–20. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>
- [23] Renner, J. S., Mensah, R. A., Jiang, L., Xu, Q., Das, O. y Berto, F. (2012). Fire Behavior of Wood-Based Composite Materials. *Polymers*, 13(24), 4352. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13244352>
- [24] Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneshwari, V. y Bhoopathi, R. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3), 589. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14030589>
- [25] Garay, R. y Henríquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 12(1), 11–24. doi: <http://doi.org/10.4067/S0718-221X2010000100002>
- [26] Kadlicová, P., Gašpercová, S. y Osvaldová, L. M. (2017). Monitoring of weight loss of fibreboard during influence of flame. *Procedia Engineering*, 192, 393–398. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.068>
- [27] Galla, Š., & Ivanovicová M. (2013). Assessment of Fire Risk of Selected Agglomerated Wooden Materials. *Research Journal of Recent Sciences*, 2(7), 43–47. Recuperado de: <http://www.isca.in/rjrs/archive/v2/i7/8.ISCA-RJRS-2013-110.pdf>
- [28] Rowell, R. M. (2013). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/b12487>
- [29] Tureková, I., Ivanovičová, M., Harangózo, J., Gašpercová, S. y Marková, I. (2022). Experimental Study of the Influence of Selected Factors on the Particle Board Ignition by Radiant Heat Flux. *Polymers*, 14(9), 1648. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14091648>
- [30] Haurie, L., Giraldo, M. P., Lacasta, A. M., Montón, J. y Sonnier, R. (2019). Influence of different parameters in the fire behaviour of seven hardwood species. *Fire Safety Journal*, 107, 193–201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.002>
- [31] Sotomayor Castellanos, J. R. y Ávila Calderón, L. E. A. (2021). Reacción al Fuego de Tres Maderas Angiospermas Impregnadas con Sales de Boro. *Revista Tecnológica Espol – RTE*, 33(1), 35–48. doi: <https://doi.org/10.37815/rte.v33n1.818>
- [32] Walker, J. C. F. (2006). *Primary Wood Processing*. Dordrecht: Springer.
- [33] Martin, A. (Ed.). (2015). *Wood Composites*. Sawston: Woodhead Publishing.
- [34] Kumar, R. N. y Pizzi, A. (2019). *Adhesives for Wood and Lignocellulosic Materials*. Beverly: Scrivener Publishing LLC.

## Diseño de una ruta de conversión de residuos lignocelulósicos para la producción de butano como sustituto del gas licuado de petróleo

Devi Orozco,<sup>1</sup> Ana Velastegui,<sup>1</sup> Nicolas Vela-García<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [nvela@usfq.edu.ec](mailto:nvela@usfq.edu.ec)

## Design of a lignocellulosic waste conversion route for the production of butane as a substitute of liquefied petroleum gas

### Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) is an essential good, mainly for domestic use, which represents 10.4% of Ecuador's energy demand. In the absence of mechanisms for the valorization of lignocellulosic waste in the country, a biomass to butane conversion route was proposed as a substitute for LPG, through a computational design to evaluate its technical, economic and environmental feasibility. The optimal waste for the process was selected based on the annual generation rate and physical-chemical composition, the configuration of the route was designed in AspenPlus® with an input of 77 t/h of biomass. Based on the sizing of the equipment and flows of the computational model, an economic and life cycle analysis was performed with a gate to gate scope using openLCA® software, additionally, the carbon footprint of the biorefinery was calculated from the inputs used in the conversion process. Butane production reached 7 t/h and an energy density of 26.7 MJ/L. Regarding the economic axis, the minimum sale price was \$1.03/kg of butane, considering the sale of lignin as a co-product. In this way, the biofuel was competitive with the sale price of 1 \$/kg of LPG. Finally, the total carbon footprint of the process modeled in OpenLCA® was 102 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, while the contribution of the inputs resulted in a carbon footprint of 128 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, values higher than the European standard of 94 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ. This research opens the door towards the optimization of resources and transformation of the country's energy matrix.

**Keywords:** BioLPG, agricultural waste, banana pseudostem, fermentation, distillation, minimum selling price, life cycle analysis.

### Resumen

El gas licuado de petróleo (GLP) es un producto de primera necesidad, principalmente de uso doméstico, que representa el 10,4% de la demanda energética del Ecuador. A falta de mecanismos para la valorización de los residuos lignocelulósicos en el país, se planteó una ruta de conversión de biomasa a butano como sustituto del GLP, mediante un diseño computacional para evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental. Se



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
15/01/2023

Aceptado /  
Accepted:  
09/03/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



seleccionó el residuo óptimo para su conversión a GLP en base a la tasa de generación anual y su composición fisicoquímica. La configuración de la ruta se diseñó en AspenPlus® con una entrada de biomasa correspondiente a 77 t/h. A partir del dimensionamiento de los equipos y flujos del modelo computacional, se realizó un análisis económico y de ciclo de vida con un alcance de puerta a puerta usando el software openLCA®. Adicionalmente, se calculó la huella de carbono de la biorrefinería a partir de los insumos usados en el proceso de conversión. La producción de butano alcanzó las 7 t/h y una densidad energética de 26,7 MJ/L. En cuanto al eje económico, el precio de venta mínimo calculado fue de 1,03 \$/kg de butano, considerando la venta de la lignina como coproducto. De esta manera, el biocombustible fue competitivo con el precio de venta al público de 1 \$/kg de GLP. Finalmente, la huella de carbono del proceso modelado en Open LCA fue de 102 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, mientras que el cálculo de los insumos resultó en una huella de carbono de 128 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, valores superiores al estándar europeo de 94 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ. Esta investigación abre la puerta hacia la optimización de los recursos y transformación de la matriz energética del país.

**Palabras clave:** BioGLP, residuos agrícolas, pseudotallo de banano, fermentación, destilación, precio de venta mínimo, análisis de ciclo de vida.

---

## INTRODUCCIÓN

### GLP

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una mezcla de hidrocarburos de cadena corta obtenido mediante la destilación fraccionada catalítica del petróleo crudo o por fraccionamiento del gas natural. El GLP está compuesto principalmente por propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), cuya proporción varía según el uso y la región [1]. Es considerado una fuente de energía versátil que se usa principalmente en casas, industrias, transporte y agricultura. El GLP desempeña un papel fundamental en el sector energético de América Latina y el Caribe, donde 440 millones de personas dependen de este combustible fósil para cocinar [2]. Adicionalmente, la Asociación Mundial del GLP reporta un consumo anual de 316 millones de toneladas [3].

Ecuador depende significativamente de la producción e importación de GLP. En el 2021, se consumió un total de 416 millones de galones de GLP, lo que representó el 10,6% de la demanda energética del país [4]. Durante el mismo año, Ecuador produjo un equivalente a 15,2% del suministro de GLP, lo cual implica que un 84,8% fue importado [4]. La demanda de este combustible fósil ha aumentado en un 128% durante la última década [5].

### Sector agrícola en Ecuador

El sector agrícola es un eje determinante en la economía del país. De acuerdo con el Banco Central de Ecuador, la agricultura representa 2,15% del Producto Interno Bruto (PIB) y es fuente de empleo del 25% de la población rural del país [6]. En el año 2018, se cosecharon 2300 millones de toneladas de cultivos que ocuparon 12,5 millones de hectáreas [7].



Cada año, Ecuador genera más de 10 millones de toneladas de residuos agrícolas [8]. Aquellos no recuperables con una fracción alta de lignina se suelen secar y combustionar, lo cual libera gases tóxicos (e.g. sulfato, óxidos de nitrógeno, amonio) y material particulado, lo cual afecta directamente a la salud de las comunidades aledañas por el aumento de enfermedades cardiovasculares o respiratorias [9]. Los residuos restantes se disponen en rellenos sanitarios o botaderos al aire libre, donde se descomponen, generando emisiones de contaminantes del aire, malos olores, eutroficación, entre otros [10].

### Métodos para la producción de BioGLP

Con respecto a las rutas de conversión de biomasa a GLP, la mayoría de las rutas termoquímicas modernas se encuentran en la fase de investigación o desarrollo. Pocas han pasado a fase de comercialización, dado que tienen un rendimiento bajo de GLP como un subproducto [11]. Tanto Fisher-tropsch como la pirolisis tienen un rendimiento de GLP bajo a escala comercial [12,13]. Adicionalmente, ambas rutas usan temperaturas elevadas durante la combustión de la biomasa [14], lo que implica un consumo energético elevado, así como costos operativos e impactos ambientales por la emisión de cenizas y material particulado [15].

Debido a ello, se han investigado nuevas rutas de conversión bioquímica como la fermentación de residuos lignocelulósicos para obtener combustible de aviación, el cual tiene un mejor rendimiento y precio de venta que el generado a partir de hidro procesamiento de aceites y grasas [16], o la fermentación de biomasa a ácido butírico para una posterior destilación y conversión del solvente a propano vía descarboxilación catalítica hidrotérmica [17].

### Objetivo

Dada la cantidad de residuos agrícolas generados en el país, los impactos negativos relacionados a su gestión inadecuada, así como la creciente demanda de GLP en el país, el presente trabajo busca estudiar la viabilidad técnica, económica y ambiental de una biorrefinería de butano como sustituto del GLP, mediante el diseño de una ruta de conversión a partir de residuos lignocelulósicos de la industria agrícola del Ecuador.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño de la ruta de conversión

Para el diseño computacional se usó el software AspenPlus®, implementando el método termodinámico NRTL a gran escala con una con una tasa de ingreso de 77 t/h, que operó 350 días al año durante 24 h. Para el diseño de la biorrefinería, se realizó un análisis comparativo para la definición del residuo más óptimo para su conversión a butano, seguido de la definición de variables de los procesos de conversión tales como estequiometría de las reacciones, temperatura, presión, rendimientos, entre otras.





### Definición de Residuo

Para la selección de la materia prima se realizó un análisis comparativo de los distintos tipos de residuos lignocelulósicos generados por la industria agrícola, en términos de tasas de generación, producción de cultivo, composición bioquímica y posibles usos. Seguido, se realizó un análisis de la composición fisicoquímica de los residuos lignocelulósicos de los siete cultivos con mayores tasas de generación, con el fin de identificar a los residuos con mayor contenido de polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) cuya tasa de fermentación es directamente proporcional a la producción de etanol [18]. La composición óptima de los residuos lignocelulósicos para la producción de bioetanol son 30%-60% de celulosa, 20%-40% hemicelulosa y 15%-25% de lignina [19]. Finalmente, se definió el tipo de residuo mediante las fracciones generadas por tipo de cultivo y usos alternativos de los residuos en el país, con el propósito de seleccionar un residuo abundante con potencial valorización comercial. Se evidenció que el tipo de residuo más abundante en términos de generación es el pseudotallo del banano, así como también el más óptimo para su conversión a GLP (Tabla S2).

### Ruta de Conversión

Una vez seleccionado el residuo, se realizó un diagrama de cajas considerando las entradas y salidas del sistema. Como se observa en la Fig.1, el sistema fue dividido en las siguientes etapas: pretratamiento, fermentación, deshidratación, oligomerización, e hidrogenación.

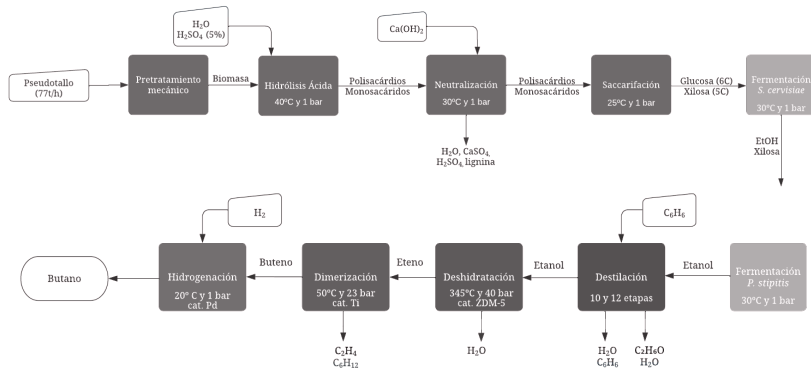


Figura 1. Diagrama de cajas proceso de conversión

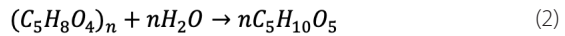
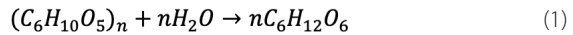
### Pretratamiento

El pretratamiento de la biomasa tiene como propósito reducir y homogeneizar el tamaño de las partículas [20]. Se asumió que los residuos lignocelulósicos han sido secados, triturados y molidos previo al pretratamiento termoquímico y bioquímico. Posteriormente se realizó una hidrólisis ácida con solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al cinco por ciento en masa en un reactor esteico a 40 °C y 1 bar durante 30 minutos [21]. La razón másica de agua a biomasa seca para fines del pretratamiento y fermentación es de 2.61, por lo que se ajustó dicha proporción a la tasa de entrada [22].

A continuación, se realizó la despolimerización de la celulosa y hemicelulosa a través de una hidrólisis enzimática, para lo cual se ajustó el pH a neutro usando hidróxido



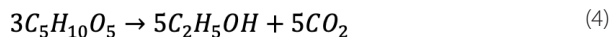
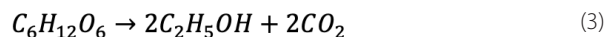
de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Se usó las tasas de reacción y conversiones de los compuestos enzimáticos Celulasa NS5001 y Hemicelulasa NS22002 a concentraciones de seis y dos por ciento en masa respectivamente, a una temperatura de 25 °C durante 24 h [23]. A estas condiciones y pretratamiento ácido, se obtiene un rendimiento del 82% de biomasa a azúcares fermentables [24]:



Se usó levoglucosano ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) y ácido glutárico ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ ) para simular los polisacáridos de seis y cinco carbonos respectivamente, pues son intermediarios en la degradación térmica de la celulosa y hemicelulosa, y además tienen propiedades fisicoquímicas y termodinámicas similares a sus macromoléculas de origen [25,26].

### Fermentación

La fermentación es el proceso en el cual algunos azúcares se transforman a etanol y dióxido de carbono, mediante la acción de microorganismos como las levaduras. *Saccharomyces cerevisiae* es una de las levaduras más usadas a nivel industrial, sin embargo no cuenta con un mecanismo metabólico para fermentar pentosas como la xilosa [27]. Por otra parte, levaduras como *Pichia stipitis* pueden fermentar estos azúcares, pero lo realiza bajo condiciones microaerobeas, en la ausencia de hexosas como la glucosa y a bajas concentraciones de etanol [28]. Es por ello que se diseñó el sistema con dos fermentadores, modelados como reactores estoicos a 30 °C y 1 bar. En el primero se planteó la conversión de la glucosa a etanol mediante *S. cerevisiae*, con un 98% de conversión en 24 h [24], mientras que en el segundo reactor se planteó la fermentación de la xilosa mediante el *P. stipitis* con una conversión del 87% en cuatro días [29]. Las reacciones de conversión se presentan a continuación:



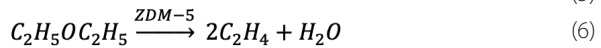
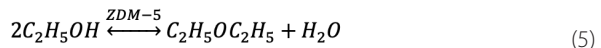
### Destilación

Posterior a la separación mecánica de monosacáridos mediante un decantador, se obtuvo una mezcla líquida de etanol y agua. Para separar estos compuestos, se modeló una columna DSTW en una simulación aparte, con el fin de estimar los parámetros de diseño de una columna de destilación de 10 etapas, con una tasa de reflujo de 3,5 molar y una fracción molar de destilado sobre entrada de 0,57. Una fracción de la mezcla de etanol y agua no se puede separar mediante la destilación convencional debido a que se comporta como un solo compuesto conocido como azeótropo, resultando en una separación incompleta de etanol [30]. Los azeótropos se separan mediante una columna azeotrópica, donde se ingresa un agente de arrastre como el benceno para romper dichos compuestos y obtener etanol con una pureza sobre el 99% [31,32]. Por ello, se configuró una columna de destilación azeotrópica de 12 etapas, una tasa de reflujo de 3,5 y una fracción molar de destilado sobre entrada de 0,518. Este último valor fue obtenido mediante estequiometría de la cantidad de etanol en la entrada y cantidad máxima del destilado.



### Deshidratación

El etanol puro se condujo a la fase de deshidratación catalítica, que consiste en la conversión de etanol a etileno en estado gaseoso a altas temperaturas sobre un catalizador. La deshidratación catalítica del etanol a etileno se realizó en un reactor isotérmico de flujo pistón a 345 °C y 40 bar. Las dimensiones del reactor fueron 15 m de altura y 9,5 m de diámetro. Para la presión se implementó la ecuación de Ergun con un factor de escalamiento de 1 y una rugosidad de 1 mm [33]. El catalizador utilizado fue la zeolita ZDM-5 a una carga de 100 kg, una densidad de partícula de 0,356 g/cm<sup>3</sup> y un diámetro de partícula promedio de 55 micrómetros [34, 35]. Se realizó una deshidratación completa, bajo el siguiente mecanismo de reacción secuencial:

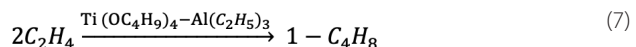


Para la reacción de deshidratación, se usó un mecanismo de reacción secuencial bi-molecular. Se implementó el modelo Langmuir-Hinshelwood-Houden-Watson (LHHW) con una constante de reacción *k* de 0.000557, una constante *n* de 0, *E* de 107 kJ/mol y una temperatura inicial de 300 °C [36]. Las constantes cinéticas pertenecen a la reacción dietiléter a eteno dado que el dietiléter es un intermediario clave en la deshidratación, cuya eliminación en los sitios activos de los catalizadores determina el rendimiento de la producción de eteno [37].

A continuación, se condujo el flujo de salida a un enfriador y un decantador a 10 °C y 1 bar para separar el agua en fase líquida del etileno en fase gaseosa. Con el fin de aprovechar el calor liberado en el proceso, se usó un intercambiador de calor, el cual transfirió la energía del flujo de salida del reactor de deshidratación para calentar la corriente de entrada al mismo reactor. Para optimizar la transferencia de calor, se usó el método Pinch con un punto intermedio entre la temperatura del flujo de entada y de salida de 250 °C, el cual no supera el máximo de transferencia de calor debido al equilibrio térmico de las dos corrientes [38,39].

### Dimerización

La dimerización es el proceso en el cual dos moléculas similares se unen para formar una nueva molécula o polímero. La dimerización del etileno a buteno se realizó en un reactor tipo estoico a 49,85 °C y presión de 23 bar [40]. Se usó un catalizador Ziegler Natta de titanio con el cual se obtiene una selectividad superior de alquenos de cadena corta (buteno y hexeno), formando menos del 0,01% de octenos [41,42].



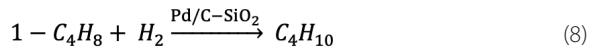
Los productos principales de este proceso son buteno y pequeñas cantidades de hexeno, con una conversión de 85,11% y selectividades de 95,91% y 4,09% respectivamente [40]. Existen otros catalizadores heterogéneos como aquellos a base de níquel y zeolitas que operan a condiciones de menor temperatura y presión, sin embargo, tienden a una



menor selectividad para el buteno [43]. Posteriormente, se separó el etileno y hexeno de forma mecánica usando decantadores a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente, obteniendo buteno en el flujo de salida.

### **Hidrogenación**

La hidrogenación consiste en la reacción del alqueno con el gas hidrógeno en presencia de un catalizador. Al añadir la molécula de hidrógeno al doble enlace, cada átomo de carbono se une a un átomo de hidrógeno logrando la ruptura del doble enlace [44]. La hidrogenación de buteno a butano se llevó a cabo por un reactor esteico a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 1 bar, ingresando un flujo de hidrógeno molecular y utilizando un catalizador de paladio con un soporte de carbono y dióxido de silicio [45]:



El producto obtenido estuvo en fase gaseosa; para obtenerlo en fase líquida se usó un compresor a 18 bar seguido de un enfriador a una temperatura de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  [46].

### **Análisis económico**

#### **Dimensionamiento de equipos e insumos**

Para extraer las dimensiones de los equipos del sistema, se activó el Analizador de Procesos Económicos® de Aspen. A partir del dimensionamiento, flujos de entrada y salida, se realizó una búsqueda de costos fijos de los equipos e insumos para cada proceso detallado en el modelo computacional. Posteriormente, se adicionaron los costos de equipos de pretratamiento mecánico y compresión de butano.

#### **Estimación de costos fijos y variables**

Para el cálculo de los costos fijos, se procedió a encontrar el costo anual equivalente de cada equipo, para lo cual se obtuvieron los costos unitarios en bases de datos del año 2014 [47]. Considerando las dimensiones de los equipos obtenidas mediante el modelo computacional, se usó el método estimación de costos por el exponente de dimensión [48]:

$$C_B = C_A \left( \frac{S_B}{S_A} \right)^N \quad (9)$$

Donde  $C_B$  es el costo aproximado del equipo de dimensión  $S_B$  y  $C_A$  es el costo unitario del equipo con dimensión igual a uno. A continuación, se realizó un ajuste al año 2020 usando el método de índice de costo de planta CEPICI, que ajusta el costo del equipo de un periodo de tiempo a otro considerando la inflación [49]:

$$C_{2020} = C_{2014} \left( \frac{CEPCI_{2020}}{CEPCI_{2014}} \right) \quad (10)$$



Una vez obtenido el costo anual equivalente para el año más próximo, se procedió a calcular la inversión considerando los costos del equipo, componentes y procesos técnicos relacionados. Para ello se multiplicó los valores por el factor de Lang para la estimación de inversiones de los equipos incluyendo sus componentes y procesos secundarios como instalación y aislamiento. El valor utilizado para este factor fue de 3.63, específico para procesos bioquímicos que combinan sólidos y líquidos [50]. Al sumar los valores de cada equipo se obtuvo la inversión total de equipos (CT). Para el cálculo del costo fijo anual, se calculó el factor de recuperación de capital (FRC) considerando un interés del nueve por ciento y una vida útil de la planta  $n$  de 25 años:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}} \quad (11)$$

Finalmente, el costo fijo anual de los equipos se calculó considerando un factor de operación y mantenimiento (FOM) del 10% de la inversión total de los equipos, con lo cual se obtuvo el costo fijo anual (CF) por la operación de los equipos:

$$CF = (FRC + FOM) \cdot CT \quad (12)$$

Las variables utilizadas para el cálculo de costos por equipo se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Variables de costos fijos

CEPCI 2020	639
CEPCI 2014	579,7
$i$	9%
FOM	10%
años	25
h/año	8400
Factor de Lang	3,63

Para los costos fijos operativos, se utilizó la tabla de carreras profesionales en el sector de la bioenergía del Departamento de Energía de los Estados Unidos, con el fin de identificar las posiciones del personal necesario para el manejo y operación de la biorrefinería [51]. A continuación, se calculó el número de personas requeridas para operar la planta, para lo cual se extrapó los resultados de una planta de menor tamaño [52]. Utilizando los sueldos promedios de la Encuesta de Empleo y Salarios Ocupacionales y Oficina de Estadísticas Laborales de EEUU se agruparon los salarios según la posición para obtener su respectivo promedio [53].

Para los costos variables, se recopilaron datos de los flujos de entrada de los insumos requeridos en las etapas y se indagó el costo por kilogramo de cada insumo en dólares (\$). En el caso de la electricidad, se obtuvo el consumo energético estimado para cada



equipo y se ajustó a los precios nacionales. Con ello se calculó el costo de los insumos por kilogramo de butano:

$$C_i = \frac{\dot{F}_i \cdot P_i}{x} \quad (13)$$

Donde  $C_i$  es el costo de cada insumo,  $\dot{F}_i$  es el flujo de entrada del insumo en unidad de insumo sobre hora,  $P_i$  es el precio de cada insumo por unidad de insumo y  $x$  es la cantidad de butano en kilogramos.

### Flujo de caja

A continuación, se realizó un flujo de caja con una proyección a 25 años de vida útil de la planta, se consideró un Valor Actual Neto (VAN) de 0 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 9%, con el fin de estimar el Precio de Venta Mínimo (PVM) en el punto de equilibrio en el cual el beneficio neto es igual a la inversión [54]. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad considerando la venta de coproductos con el fin de evaluar la rentabilidad del proyecto bajo distintos escenarios [55]. Para ello se consideró la venta de lignina en 100 \$/kg.

### Análisis de ciclo de vida

En base a los resultados del modelo computacional y en conformidad con la norma ISO 1440 y 14044, se procedió a elaborar el análisis de ciclo de vida (ACV), con la finalidad de determinar la magnitud de los potenciales impactos ambientales de la biorrefinería, desde la extracción de la biomasa hasta la producción del biocombustible de interés. Para ello, se usó el software openLCA® por su accesibilidad a múltiples bases de datos y facilidad de manejo [56].

### Límites del sistema, unidad funcional y alcance

Se definió los límites del sistema bajo un enfoque "gate to gate" (de puerta a puerta), con el propósito de plantear en el análisis desde el ingreso de la materia prima a la planta hasta obtener el producto deseado [57]. El sistema incluyó las siguientes etapas: pretratamiento mecánico, hidrólisis ácida y neutralización, sacarificación (hidrólisis enzimática), fermentación, destilación, deshidratación, dimerización e hidrólisis. La unidad funcional fue de 1 MJ y no se seleccionó una unidad volumétrica de combustible como base dado que el volumen del gas varía según las condiciones de presión y temperatura para su transporte y distribución, etapas que no se consideran en el alcance de este estudio.

### Inventariow

Posteriormente, se recopiló la información de entradas y salidas de cada proceso, para lo que se complementaron los flujos del modelo computacional en AspenPlus® con datos sobre origen de insumos, consumo de recursos energéticos e hídricos de los equipos, tipo de residuos generados, entre otros. Para ello, se utilizaron tres bases de datos de libre acceso para encontrar todos los flujos necesarios: Agribalyse 3,1, Bioenergiedat 18, Ecoinvent 3,7 y Environmental Footprints. Estos flujos se basan en información que compila los impactos ambientales de distintos procesos. Al seleccionar cada flujo,



fue necesario analizar sus procesos de origen para poder asegurar que los impactos generados por el mismo sean congruentes con el presente estudio. A continuación, se crearon los procesos según las etapas mencionadas previamente. Para ello se ingresaron las entradas y salidas de los flujos correspondientes tomando en cuenta las cantidades de cada una según el modelo computacional.

### **Análisis de impacto ambiental**

Una vez creado los procesos se creó el sistema de hidrogenación, el cual acarrea todos los impactos de cada proceso. El sistema se configuró para la producción de un kilogramo de butano para luego obtener las emisiones sobre unidad de energía contenida en el combustible. La metodología de impacto ambiental utilizada fue el GWP 100a del IPCC 2013, que se basa en la información publicada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. El método expresa las emisiones de gases de efecto invernadero producidas en un horizonte temporal de 100 años en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente [58]. Existen otros métodos como CML y TRACI 2,1, contienen más categorías de impacto, sin embargo, para fines de este estudio, se busca medir la huella de carbono.

### **Interpretación de resultados**

Con la finalidad de realizar un análisis de las emisiones por cada insumo, se realizó un cálculo manual utilizando los factores de emisión del CENACE para la electricidad y gas natural [59]. Se realizó el cálculo manual como se ve en la siguiente ecuación:

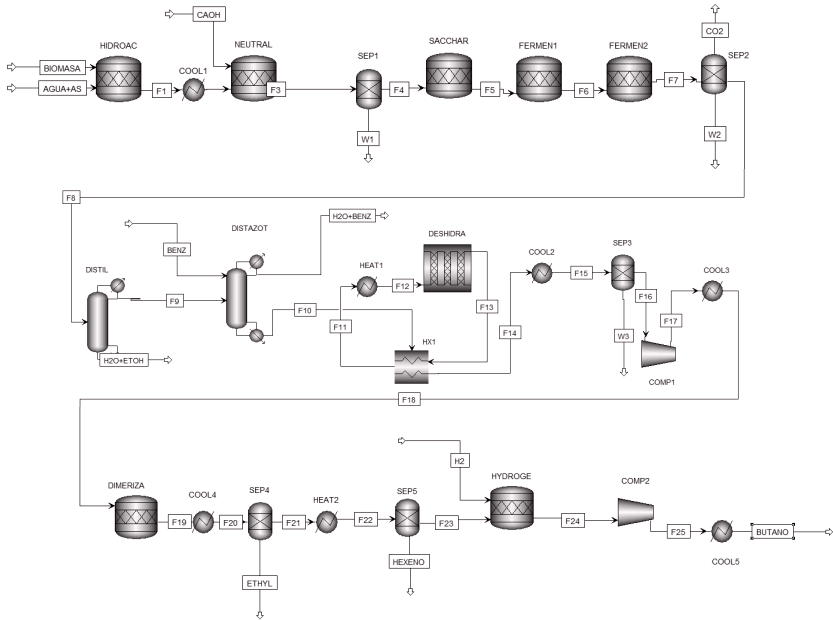
$$\text{Emisiones} \left( \frac{gCO_2eq}{MJ} \right) = \frac{A \left( \frac{U}{h} \right) * FE \left( \frac{gCO_2eq}{U} \right)}{x \left( \frac{kg}{h} \right) * PCI \left( \frac{MJ}{kg} \right)} \quad (14)$$

Donde A es la actividad o flujo del insumo, U representa la unidad del flujo (e.g. MJ, kg o L), FE es el factor de emisión del insumo, x es la tasa de butano producido y PCI es el poder calorífico inferior del butano, equivalente a 45,3 MJ/kg [60].

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Diseño de la ruta de conversión**

En la Fig. 2 se observa el modelo computacional, con el cual se consiguió una tasa de producción de butano de 7042 kg/h, es decir 10,7% del pseudotallo seco (65408 kg/h) o 9% del pseudotallo previo al pretratamiento mecánico (77000 kg/h). El porcentaje de conversión total de biomasa a butano fue mayor a los métodos termoquímicos tradicionales como pirólisis (3,5-6,5%) y gasificación con síntesis de Fischer Tropsh (5%-7,5%) [61]. A diferencia de estos métodos, la ruta propuesta genera butano como producto principal. En el caso de las rutas bioquímicas, la oligomerización de biogás a GLP alcanza una selectividad del 90% del total de combustibles generados [62], mientras que la ruta propuesta consigue una selectividad del 82% con respecto al hexeno y etileno generados durante la oligomerización. Por otra parte, el biopropano producido de forma comercial por el método HVO tiene una conversión similar al presente estudio, alcanzando un 11% de conversión del aceite vegetal a propano [63].



**Figura 2.** Modelo Computacional Biorrefinería

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas de este combustible en fase líquida, el diseño indica una densidad de 0,59 kg/L, con una densidad energética del combustible renovable es de 26,7 MJ/L. Es decir, por cada litro de butano combustionado, se obtiene 9,4% más energía que el GLP convencional (24,4 MJ/L) [60]. Por lo tanto, el butano obtenido es óptimo en términos de aprovechamiento energético, pues se requiere menos combustible para conseguir la misma energía que el combustible fósil.

Con respecto a las fases de conversión, durante la fermentación se produjo etanol con una tasa de 15,54 t/h, es decir, 2376% de la entrada de biomasa seca o 49,28% de los azúcares fermentables. Este último rendimiento supera al 38% obtenido durante el tratamiento de hojas de banano [64], debido a que el pseudotallo del banano del presente estudio tiene mayores porcentajes de celulosa y hemicelulosa en la biomasa de entrada (Tabla S2). Adicionalmente, los porcentajes de etanol incrementan al aprovechar la mayor cantidad de azúcares fermentables como la xilosa.

Durante la destilación, se obtuvo una recuperación de 13,9 t de etanol, es decir el 88% de todo el etanol producido. El benceno es el agente de arrastre de mayor uso y antigüedad en la industria petroquímica. Debido a su alta volatilidad, se emplea para generar un nuevo azeótropo con un menor punto de ebullición [65]. Si bien la destilación azeotrópica genera una remoción de agua considerable con benceno, éste compuesto es altamente carcinogénico, por lo que su exposición podría causar graves problemas a la salud de los operadores de la planta [66]. Otros agentes de arrastre como el ciclohexano resultan favorables en términos de menor toxicidad y remoción





casi completa de agua, alcanzando un valor teórico de 99,7% [67], por lo que se puede sustituir el benceno por este agente de arrastre.

### Análisis Económico

Los costos fijos se dividieron para cada etapa del modelo computacional, como se evidencia en la Fig. 3. El pretratamiento mecánico tuvo el menor costo dado que solo se requirió tres equipos para moler, cortar y secar la biomasa. La etapa de mayor costo fijo fue la hidrogenación, pues al finalizar el proceso termoquímico, se utilizó un compresor y un condensador para aumentar la presión del butano y disminuir su temperatura con el fin de obtener el combustible en estado líquido. La deshidratación también representó costos significativos, dado que se requirió un intercambiador de calor para alcanzar la temperatura de operación del reactor en el flujo de entrada. Durante la hidrólisis se ingresó 65 t/h de biomasa y 171 t/h de agua purificada, por lo que se requirió de un purificador y calentador de dimensiones y costos proporcionales al flujo de ingreso.

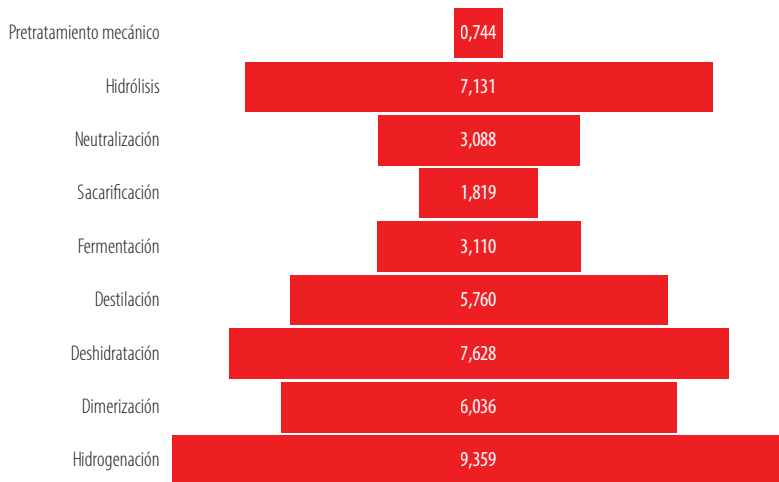


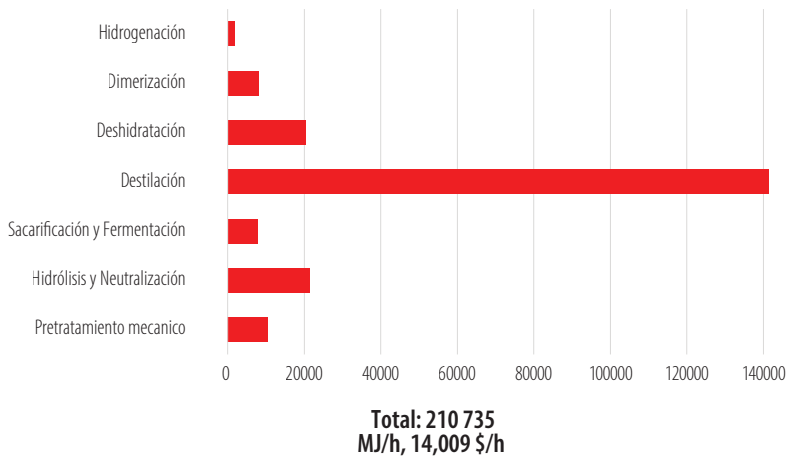
Figura 3. Costos fijos de equipos por etapa en millones de dólares (M\$)

En la Tabla 2 se evidencian los costos variables por kg de butano producido. La hidrólisis y neutralización representaron 14 y 19 centavos respectivamente. Durante las dos etapas del proceso se ingresaron las mayores cantidades de insumos, nueve toneladas de ácido sulfúrico y siete toneladas de hidróxido de calcio, con un costo de 93 y 200 \$/t de insumo respectivo, por lo que el ácido sulfúrico como el hidróxido de calcio contribuyeron significativamente en los costos variables del producto. El costo del benceno es de 45 \$/t, siendo económico en comparación con otras materias primas del proceso. Pese a ello, al hacer la comparación por fase, la destilación representó el tercer proceso más costo.

**Tabla 2.** Huella de carbono por proceso.

Proceso	Porcentaje (%)	Consumo (kg CO <sub>2</sub> -eq/ kg butano)
Pretratamiento Mecánico	3,19	0,15
Hydrolisis- Neutralización	2,77	0,13
Sacarificación	6,97	0,33
Fermentación	25,9	1,21
Destilación	57,3	2,69
Deshidratación	2,66	0,12
Dimerización	1,06	0,05
Hidrogenación	0,23	0,01
Total	100	4,69

Como se observa en la Fig. 4, el mayor consumo energético de la planta sucede durante la destilación. Para producir 18634 L de etanol se requirieron de 140000 MJ/h, es decir, 7.5 MJ/L. A nivel comercial, la destilación representa del 55 al 65% de la demanda energética de toda la planta [68], lo cual es consistente con el porcentaje de energía destinado a la destilación (67%). Dado que las dos columnas de destilación no son adiabáticas, requieren de más energía en condensadores y calderas para compensar la pérdida de energía por disipación de calor. Una de las maneras para disminuir la demanda energética de las unidades de destilación hasta en un 50% es integrar bombas o intercambiadores de calor al proceso, así como aislar la columna de forma térmica con fibra de vidrio o sílice [69,70].



**Figura 4.** Consumo energético por etapa en mega julio por hora (MJ/h)

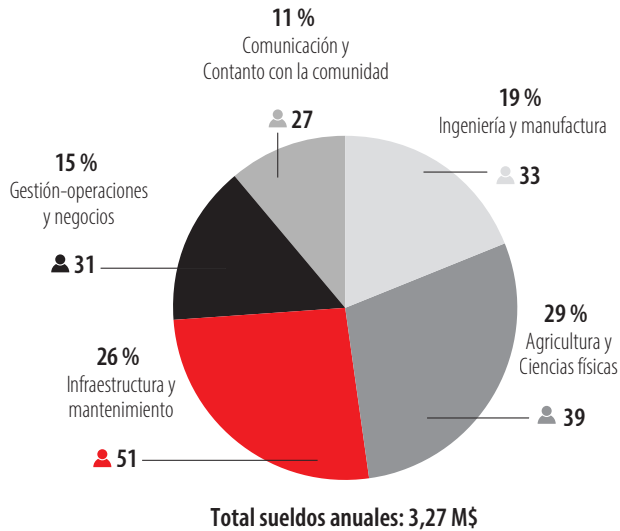


Los costos fijos operativos representan los sueldos del personal de la biorrefinería. Como se observa en la Fig. 2, el valor total de los sueldos anuales representó 3,27 millones de dólares para 181 empleados, siendo el área de agricultura y ciencias físicas la de mayor costo, con 39 especialistas y técnicos encargados el tratamiento de residuos lignocelulósicos, así como de asegurar un control de las fases bioquímicas del proceso de conversión. Seguido de ello están las áreas de infraestructura y mantenimiento e ingeniería y manufactura, las cuales representaron el 26 y 19% del costo total, contando con 51 profesionales en construcción y operadores de maquinaria y con 33 profesionales encargados del control de procesos químicos, mecánicos y ambientales. Finalmente, las áreas de gestión de negocios y comunicación contaron con un equipo legal y administrativo de 58 personas encargadas del desarrollo sostenible del proyecto, en términos económicos, legales, administrativos y de comunicación con la comunidad.

En cuanto al flujo de caja, se obtuvo un precio de venta mínimo de butano correspondiente a 1,19 \$/kg, con una tasa interna de retorno de 9%, con el noveno año como último año negativo. Sin considerar el subsidio, el precio de venta del GLP en Ecuador es de 1,01 \$/kg [71]. Si bien el precio obtenido mediante este estudio es mayor al comercial, puede disminuir mediante la venta de coproductos. Para el análisis de sensibilidad se consideró la venta de lignina a 100 \$/t, con lo cual se obtuvo 1,03 \$/kg, por lo que el butano producido bajo los métodos descritos es competitivo con el GLP fósil.

### **Análisis de ciclo de vida**

La cuantificación de la huella de carbono se dividió por etapa del proceso de conversión, como se muestra en la Tabla 2. La huella de carbono total fue de 4,69 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg butano producido o 102,55 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ. La destilación contribuye al 57% de la huella de carbono de la biorrefinería dado su alto consumo energético, como se puede apreciar en la Fig. 4, seguido de la fermentación con el 26% de las emisiones totales de la planta. Adicionalmente, la fermentación genera una salida de 14 toneladas de CO<sub>2</sub>, que se reflejan en las emisiones de la etapa de fermentación, correspondientes al 25% de la huella de carbono de la planta. Es importante considerar que el dióxido de carbono es de origen biogénico, dado que resulta del procesamiento directo de un residuo lignocelulósico. Estas emisiones se pueden reducir mediante métodos de captura de carbono y almacenamiento. Uno de los métodos más recientes consiste en la captura del dióxido de carbono y su reacción con una solución de hidróxido de sodio con el fin de generar carbonato de sodio como coproducto [72].



**Figura 5.** Costos fijos operativos biorrefinería

En la Tabla 3 se observa la contribución a la huella de carbono de la biorrefinería por insumo. La huella de carbono de las materias primas utilizadas fue de 128,39 g CO<sub>2</sub>-eq /MJ, valor superior al obtenido en el software, dado que el análisis de insumos incluye los flujos de enzimas y levaduras utilizadas en el proceso. De este valor, el gas natural corresponde a 33,9 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ y la electricidad a 5,29 g CO<sub>2</sub>-eq /MJ. Esta diferencia se da porque la mayoría de los equipos funcionan con gas natural, solo la moledora, cortadora y compresores requieren de electricidad. El benceno es el segundo insumo que produce la mayor huella de carbono debido a que tiene el factor de emisión más alto (1,76 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg benceno), lo cual es consistente con la alta generación de emisiones de gases de efecto invernadero durante la etapa de destilación y durante producción de compuestos aromáticos en la industria petroquímica [73].

**Tabla 3.** Huella de carbono biorrefinería por insumo.

Insumo	Cantidad	g CO <sub>2</sub> -eq/MJ
Ácido Sulfúrico	9000,00 kg/h	3,91
Benceno	6000,00 kg/h	32,78
Hidróxido de Calcio	6728,13 kg/h	14,39
Agua Potable	171067,96 L/h	0,17
Acetato de sodio para buffer 0,1 M (PH 5,5)	634,92 kg/h	4,53
Ácido Acético para buffer 0,1 M (PH 5,5)	195,58 kg/h	0,37
Celulosa NS50013	654,08 kg/h	20,71
Hemicelulosa NS22002	218,03 kg/h	6,90



Insumo	Cantidad		g CO <sub>2</sub> -eq/MJ
Tasa de Oxígeno	919,43	L/h	1,67
Tasa de Hidrógeno	302,38	kg/h	1,53
Refrigerante Amoniaco R717	399,12	kg/h	2,23
Gas Natural	194742,98	MJ/h	33,91
Electricidad	4442,28	kWh	5,29
<b>Total</b>			<b>128,38</b>

La Comisión de la Unión Europea estableció en el 2019 un estándar para el uso del combustible fósil en la industria de transporte de un valor de 94,2 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, el cual es menor al calculado en este estudio [74]. A pesar de que la producción del combustible propuesto a partir del pseudotallo del banano emite más CO<sub>2</sub>-eq en comparación al estándar europeo, es factible reducir las emisiones al valor estándar mediante un agente de arrastre con un menor factor de emisión o cambiando el sistema de separación de etanol y agua (fase de destilación) por una membrana de pervaporación [75].

**Tabla 4.** Costos variables de insumos en centavo de dólar por kg de butano (¢/kg)

Costos Variables Insumos (¢/kg)	
Hidrólisis	14,00
Neutralización	19,00
Sacarificación	1,50
Fermentación	0,18
Destilación	3,84
Deshidratación	0,05
Dimerización	0,12
Hidrogenación	0,04
<b>Total</b>	<b>38,73</b>

## CONCLUSIONES

Se diseñó una ruta de conversión bioquímica factible en términos técnicos y económicos a partir del pseudotallo del banano, residuo de la industria agrícola del Ecuador. Mediante el modelo de biorrefinería en AspenPlus®, se obtuvo una conversión de biomasa seca a butano del 10,7%, lo que supera a los métodos tradicionales. Adicionalmente, se comprobó que la combustión de un litro de butano genera 26,7 MJ de energía, siendo 9,4% más energético que el GLP fósil. El precio de venta mínimo de butano fue 1,19 \$/kg en el punto de equilibrio, con una tasa interna de retorno del nueve por ciento y ganancias al décimo año. Mediante la venta de lignina se alcanzó un precio de 1,03 \$/



kg de butano, valor competitivo con el precio de venta nacional de GLP sin subsidio. El consumo energético fue significativo en la fase de destilación por lo que sugiere optimizar el proceso mediante el aislamiento térmico de las columnas. Finalmente, se realizaron dos procesos de huella de carbono con un alcance de puerta a puerta, es decir únicamente considerando los procesos que ocurren dentro de la planta. El primer proceso se completó utilizando OpenLCA®, lo que produjo un valor de 102 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ. El segundo proceso se realizó en Excel y produjo un valor de 128,39 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ. Ambos valores se encuentran por encima del estándar europeo de 94 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ de modo que nuestra biorrefinería no cumple con dicho parámetro. Con el fin de disminuir las emisiones, se sugiere optimizar los flujos del proceso y cambiar el agente de arrastre. Esta investigación provee una línea base a instituciones e investigadores interesados en la producción de biocombustibles, así como la transformación de la matriz energética del país.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Todos los autores concibieron la investigación y realizaron una revisión crítica sobre el contenido intelectual del manuscrito. Nicolás Vela-García administró el proyecto, realizó la supervisión y tutoría, así como la validación y verificación de resultados del mismo. Devi Orozco y Ana Velástegui diseñaron la metodología, corrieron los análisis, procesaron los resultados, produjeron las tablas, figuras, material suplementario y redactaron el manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERÉS

El autor Fernando Nicolás Vela-García es editor de la revista *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, sin embargo, no participó en el proceso de edición ni revisión del presente artículo.



## REFERENCIAS

- [1] Ryskamp, R. (2017). *Emissions and Performance of Liquefied Petroleum Gas as a Transportation Fuel: A Review*. Recuperado de <https://auto-gas.net/wp-content/uploads/2019/11/2017-WLPGA-Literature-Review.pdf>
- [2] Troncoso, K. y Soares, A. (2017). LPG fuel subsidies in Latin America and the use of solid fuels to cook. *Energy Policy*, 107, 188–196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.046>
- [3] WLPGA y Argus. (n/f). *Latin America 2020 WLPGA*. Recuperado de; <https://www.wlpga.org/publications/>
- [4] Ministerio de Energía y Minas. (2021a). *Balance Energético Nacional 2021*.
- [5] Banco Central del Ecuador. (2012). *Reporte Del Sector Petrolero*. In Banco Central del Ecuador. Recuperado de <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP201606.pdf>
- [6] Banco Central del Ecuador. (n/f). *Informe de la evolución de la economía ecuatoriana en 2021 y perspectivas 2022*. Recuperado de [https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/EvolEconEcu\\_2021pers2022.pdf](https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/EvolEconEcu_2021pers2022.pdf)
- [7] Márquez, J. (2021). *Boletín Técnico: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, 2020*. Recuperado de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-nec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2020/Boletin%20Tecnico%20ESPAC%202020.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-nec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Boletin%20Tecnico%20ESPAC%202020.pdf)
- [8] Loor, M. C., Andrade, F., Lizarzaburu, L., y Masache, M. (2017). *Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador*. Cepal. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/41830-valoracion-economica-cobeneficios-aprovechamiento-energetico-residuos-agricolas>
- [9] Ballesteros-González, K., Sullivan, A. P. y Morales-Betancourt, R. (2020). Estimating the air quality and health impacts of biomass burning in northern South America using a chemical transport model. *Science of the Total Environment*, 739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139755>
- [10] Singh, R., Das, R., Sangwan, S., Rohatgi, B., Khanam, R., Peera, S. K. P. G., Das, S., Lyngdoh, Y. A., Langyan, S., Shukla, A., Shrivastava, M. y Misra, S. (2021). Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review. *Environmental Sustainability*, 4(4), 619–636. doi: <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x>
- [11] The Global LPG Partnership. (2020). *Assessing Potential for BioLPG Production and Use within the Cooking Energy Sector in Africa*. Global LPG Partnership, September. Recuperado de <https://mecs.org.uk/wp-content/uploads/2020/09/GLPGP-Potential-for-BioLPG-Production-and-Use-as-Clean-Cooking-Energy-in-Africa-2020.pdf>
- [12] Johnson, E. (2019a). Process technologies and projects for BiOLPG. *Energies*, 12(2). doi: <https://doi.org/10.3390/en12020250>
- [13] Teimouri, Z., Abatzoglou, N., y Dalai, A. K. (2021). Kinetics and selectivity study of fischer-tropsch synthesis to c5+ hydrocarbons: A review. *Catalysts*, 11(3), 19–31. doi: <https://doi.org/10.3390/catal11030330>
- [14] Kan, T., Strezov, V., Evans, T., He, J., Kumar, R., y Lu, Q. (2020). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34.. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110305>
- [15] Costa, M., Piazzullo, D., Di, D., y Vita, A. De. (2022). Sustainability assessment of the whole biomass-to-energy chain of a combined heat and power plant based on biomass gasification: biomass supply chain management and life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 317(115434). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115434>
- [16] Vela-garcía, N., Bolonio, D., García-martínez, M., Ortega, M. F., Almeida, D. y Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244(114534). doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114534>
- [17] Onwudili, J. A. y Nouwe Edou, D. J. (2022). Process modelling and economic evaluation of biopropane production from aqueous butyric acid feedstock. *Renewable Energy*, 184, 80–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.043>
- [18] Retto-Hernandez, P., Rojas, M. L., Lescano, L., Sanchez-Gonzalez, J., y Linares, G. (2020a). *Lignocellulosic agroindustrial waste in Peru: Potential for bioethanol, energy, and reduction of CO<sub>2</sub> emission*. Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology. doi: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.463>
- [19] Vandenberghe, L. P. de S., Junior, N. L., Valladares-Diestra, K. K., Bittencourt, G. A., Murawski de Mello, A. F., Karp, S. G., Junior Letti, L. A., y Socol, C. R. (2022). Nonwaste technology in the bioethanol and biodiesel industries. *Biofuels and Bioenergy*, 41–60. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85269-2.00019-8>



- [20] Arce, C., y Kratky, L. (2022). Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass toward enzymatic/fermentative valorization. *IScience*, 25(104610), 1–8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci>
- [21] Shimizu, F. L., Monteiro, P. Q., Ghiraldi, P. H. C., Melati, R. B., Pagnocca, F. C., Souza, W. de, Sant'Anna, C., y Brienzo, M. (2018). Acid, alkali and peroxide pretreatments increase the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem. *Industrial Crops and Products*, 115, 62–68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.024>
- [22] Pfromm, P. (2008). The Minimum Water Consumption of Ethanol Production via Biomass Fermentation. *The Open Chemical Engineering Journal*, 2(2). doi: <https://doi.org/10.2174/1874123100802010001>
- [23] de Souza, E. L., Sellin, N., Marangoni, C., y Souza, O. (2017). The Influence of Different Strategies for the Saccharification of the Banana Plant Pseudostem and the Detoxification of Concentrated Broth on Bioethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183(3), 943–965. doi: <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2475-7>
- [24] Souza, E. L., Liebl, G. F., Marangoni, C., Sellin, N., Montagnoli, M. S., y Souza, O. (2014). Bioethanol from fresh and dried banana plant pseudostem. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 271–276. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1438046>
- [25] Shoji, T., Kawamoto, H., y Saka, S. (2014). Boiling point of levoglucosan and devolatilization temperatures in cellulose pyrolysis measured at different heating area temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 109, 185–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.014>
- [26] Wang, J., Shen, X., Lin, Y., Chen, Z., Yang, Y., Yuan, Q., y Yan, Y. (2018). Investigation of the Synergetic Effect of Xylose Metabolic Pathways on the Production of Glutaric Acid. *ACS Synthetic Biology*, 7(1), 24–29. doi: <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00271>
- [27] Moysés, D. N., Reis, V. C. B., de Almeida, J. R. M., de Moraes, L. M. P., y Torres, F. A. G. (2016). Xylose fermentation by *saccharomyces cerevisiae*: Challenges and prospects. In *International Journal of Molecular Sciences*, 17(3). MDPI AG. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms170320207>
- [28] Nosrati-Ghods, N., Harrison, S. T. L., Isafiade, A. J., y Tai, S. L. (2020). Analysis of ethanol production from xylose using *Pichia stipitis* in microaerobic conditions through experimental observations and kinetic modelling. *Biochemical Engineering Journal*, 164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107754>
- [29] Silva, J. P. A., Mussatto, S. I., Roberto, I. C., y Teixeira, J. A. (2011). Ethanol production from xylose by *Pichia stipitis* NRRL Y-7124 in a stirred tank bioreactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(1), 151–156. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000100016>
- [30] Gil, I. D., Uyazán, A. M., Aguilar, J. L., Rodríguez, G., y Caicedo, L. A. (2008). Separation Of Ethanol And Water By Extractive Distillation With Salt And Solvent As Entrainer: Process Simulation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(01), 207–215. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000100021>
- [31] Junqueira, T. L., Filho, R. M., & Maciel, M. R. W. (2009). Simulation of distillation process in the bioethanol production using nonequilibrium stage model. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 27, 735–740. doi: [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70343-8](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70343-8)
- [32] Li, G. y Bai, P. (2012). New operation strategy for separation of ethanol-water by extractive distillation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(6), 2723–2729. doi: <https://doi.org/10.1021/ie2026579>
- [33] Frosi, M., Tripodi, A., Conte, F., Ramis, G., Mahinpey, N. y Rossetti, I. (2021). Ethylene from renewable ethanol: Process optimization and economic feasibility assessment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 104, 272–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.026>
- [34] Becerra, J., Quiroga, E., Tello, E., Figueredo, M. y Cobo, M. (2018). Kinetic modeling of polymer-grade ethylene production by diluted ethanol dehydration over H-ZSM-5 for industrial design. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6165–6174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.035>
- [35] ACS Material. (n/f). *Technical Data Sheet Series Zeolite Powder*. Recuperado de <https://www.acsmaterial.com/zsm-5-series-zeolite-powder.html>
- [36] Frosi, M., Tripodi, A., Conte, F., Ramis, G., Mahinpey, N. y Rossetti, I. (2021). Ethylene from renewable ethanol: Process optimization and economic feasibility assessment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 104, 272–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.026>



- [37] Al-Faze, R., Kozhevnikova, E. F. y Kozhevnikov, I. v. (2021). Diethyl Ether Conversion to Ethene and Ethanol Catalyzed by Heteropoly Acids. *ACS Omega*, 6(13), 9310–9318. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00958>
- [38] Palomino Infante, A. (2004). Análisis Pinch y su contribución a la integración de procesos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 70(3), 167–174. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/rsqp/n3\\_2004/a06.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/rsqp/n3_2004/a06.pdf)
- [39] Rossi, C. (2021). *Análisis PINCH: Herramienta práctica para la eficiencia térmica en procesos, reducción de costos e impacto ambiental*. Recuperado de <https://www.cecacier.org/wp-content/uploads/2021/07/Analisis-Pinch-24-6-2021-CRS.pdf>
- [40] Mohammadzade Fard, S., Farsi, M. y Rahimpour, M. R. (2021). Optimization of ethylene dimerization in a bubble column reactor based on coupling kinetic and equilibrium models. *Chemical Engineering Research and Design*, 174, 357–364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.07.030>
- [41] Belov, G. P. (2008). Selective dimerization, oligomerization, homopolymerization and copolymerization of olefins with complex organometallic catalysts. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 81(9), 1655–1666. doi: <https://doi.org/10.1134/S107042720809036X>
- [42] Hamed, S., Soudbar, D. y Pavari, M. (2010). Selective Ethylene Dimerization Toward 1-butene by a New Highly Efficient Catalyst System and Determination of Its Optimum Operating Conditions in a Buchi Reactor. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 1(3), 276–281. doi: <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2010.V1.48>
- [43] Ristic, M. y Pacolli, M. (2017). *Oligomerization of Ethylene and Ethanol into Fuel Through Heterogeneous Catalysis*. Lund University. Recuperado de <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8916580&fileId=8916582>
- [44] Kwantlen Polytechnic University. (n/f). *Reaction of Alkenes: Hydrogenation*. Recuperado de <https://kpu.pressbooks.pub/organicchemistry/chapter/10-5-reaction-of-alkenes-hydrogenation/#>
- [45] Akhchurin, T. I., Baibulatova, N. Z., Grabovskii, S. A., Talipova, P. P., Galkin, E. G. y Dokichev, V. A. (2016). Alkene hydrogenation over palladium supported on a carbon–silica material. *Kinetics and Catalysis*, 57(5), 586–591. doi: <https://doi.org/10.1134/S0023158416050025>
- [46] Tianlong. (n/f). Recuperado de [https://www.alibaba.com/product-detail/Lpg-Cylinder-Hot-Quality-12-5kg\\_62455310881.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.c96d26e099dlRc&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Lpg-Cylinder-Hot-Quality-12-5kg_62455310881.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.c96d26e099dlRc&s=p)
- [47] Chemical Engineering. (2014, marzo). *Economic Indicators*. Recuperado de <https://www.chemengonline.com/economic-indicators>.
- [48] Guthrie, K. M. (1969). Capital Cost Estimating. *Chemical Engineering*, 114-142. <https://dokumen.tips/documents/capital-cost-estimating-guthrie-1969.html?page=31>
- [49] Mignard, D. (2014). Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(2), 285–294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.022>
- [50] Cheali, P., Germaey, K. v. y Sin, G. (2015). Uncertainties in early-stage capital cost estimation of process design - A case study on biorefinery design. *Frontiers in Energy Research*, 3. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00003>
- [51] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n/f). *Bioenergy Career Grid*. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-career-grid>
- [52] Zhang, Y., Goldberg, M., Tan, E. y Meyer, P. A. (2016). Estimation of economic impacts of cellulosic biofuel production: A comparative analysis of three biofuel pathways. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(3), 281–298. doi: <https://doi.org/10.1002/bbb.1637>
- [53] Bureau of Labor Statistics. (2021). May 2021 OEWS Research Estimates. *Nursing Research*, 16(1). [https://www.bls.gov/oes/2021/may/oes\\_research\\_estimates.htm](https://www.bls.gov/oes/2021/may/oes_research_estimates.htm)
- [54] Vianey, J. (2018). *Aportes teóricos sobre el flujo de caja*. Pontificia Universidad Javeriana Cali. Documento de clase. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29021.72166>
- [55] Lindorfer, J., Rosenfeld, D., Annevelink, B. y Mandl, M. (2019, junio). *Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts Developing a practical approach for characterization*. IEA Bioenergy. Recuperado de <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-technical-economic-and-environmental-assessment-of-biorefinery-concepts-developing-a-practical-approach-for-characterisation/>
- [56] GreenDelta. (2022). *openLCA modeling suite*. Recuperado de <https://www.openlca.org/openlca/>

- [57] Li, M. y Subramaniam, B. (2017). *LCA for Green Chemical Synthesis Terephthalic Acid*. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 387–396. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10086-7>
- [58] Neves, T. I., Uyeda, C. A., Carvalho, M. y Abrahão, R. (2018). Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization — *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone — using chemical fertilization and biosolids. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(30). doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6406-4>
- [59] Estrella, L. H. (2021). *Factor de emisión de CO<sub>2</sub> del Sistema Nacional Interconectado - Informe 2020*. Ministerio de Ambiente. Recuperado de [https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/factor\\_de\\_emision\\_de\\_co2\\_del\\_sistema\\_nacional\\_interconectado\\_de\\_ecuador\\_-\\_informe\\_2019.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/factor_de_emision_de_co2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_-_informe_2019.pdf)
- [60] Mcallister, S. y Processes, C. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8>
- [61] Johnson, E. (2019b). Process technologies and projects for BiOLPG. *Energies*, 12(2). doi: <https://doi.org/10.3390/en12020250>
- [62] Europe Liquid Gas. (2021). *BIOLPG A Renewable Pathway towards 2050*. Recuperado de: <https://www.liquidgaseurope.eu>
- [63] Hopwood, L., Mitchell, E. y Sourmelis, S. (2019). *Biopropane: Feedstocks, Feasibility and our Future Pathway*. Recuperado de [www.nnfcc.co.uk](http://www.nnfcc.co.uk)
- [64] Suhag, M., Kumar, A. y Singh, J. (2020). Saccharification and fermentation of pretreated banana leaf waste for ethanol production. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1–9. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03215-x>
- [65] Young, S. y Fortey, E. (1902). The Properties of Mixtures of the Lower Alcohols with Benzene and with Benzene and Water. *Journal of the Chemical Society*, 81, 739–752. doi: <https://doi.org/10.1039/CT9028100739>
- [66] IARC. (2017). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Benzene*. 120. Recuperado de <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Benzene-2018>
- [67] Koczka, K., Mizsey, P. y Fonyo, Z. (2007). Rigorous modelling and optimization of hybrid separation processes based on pervaporation. *Central European Journal of Chemistry*, 5(4), 1124–1147. doi: <https://doi.org/10.2478/s11532-007-0050-8>
- [68] Eweremadu, C. y Rutto, H. (2010). Investigation of Heat Loss in Ethanol-Water Distillation Column with Direct Vapour Recompression Heat Pump. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 4(9), 548–549. [www.scholar.waset.org/1307-6892/1577](http://www.scholar.waset.org/1307-6892/1577)
- [69] Kiss, A. A. y Smith, R. (2020). Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry. *Energy*, 203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117788>
- [70] NETZSH. (2014). *Thermal Insulation Materials. Analysing & Testing*. Recuperado de [https://analyzing-testing.netzsch.com/\\_Resources/Persistent/c/1/3/b/c13b995631cc9637b854c5ed9a103aed7a15832/Thermal\\_Insulation\\_Materials\\_E\\_0214.pdf](https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/c/1/3/b/c13b995631cc9637b854c5ed9a103aed7a15832/Thermal_Insulation_Materials_E_0214.pdf)
- [71] La Hora. (2021, agosto 04). *El subsidio por tanque de gas supera los \$13*. La Hora. Recuperado de <https://www.lahora.com.ec/pais/el-subsidio-por-tanque-de-gas-supera-los-13/>
- [72] Gueddari-Aourir, A., García-Alaminos, A., García-Yuste, S., Alonso-Moreno, C., Canales-Vázquez, J. y Zafrilla, J. E. (2022). The carbon footprint balance of a real-case wine fermentation CO<sub>2</sub> capture and utilization strategy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112058>
- [73] Mir, A., Tabar, M. y Fakhr, S. E. (2019). *Greenhouse Gas Emission Estimation by Life Cycle Assessment Approach in Petrochemical Industry*. 4th International Congress of Developing Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran. <https://www.researchgate.net/publication/337227174>
- [74] Edwards, R., O'Connell, A., Padella, M., Giuntoli, J., Koeble, R., Bulgheroni, C., Marelli, L. y Lonza, L. (2019). *Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation*. Publication office. doi: <https://doi.org/10.2760/69179>
- [75] Peng, P., Lan, Y., Liang, L. y Jia, K. (2021). Membranes for bioethanol production by pervaporation. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1–33. doi: <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01857-y>

## Simulation of ultimatum game with Artificial Intelligence and biases

Julio C. Añasco Flores<sup>1</sup>, Bryan J. Naranjo Navas<sup>1</sup>, Pamela A. Proaño Mora<sup>1</sup>, Maria A. Vasileuski Kramskova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Economics, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [julio.anasco@gmail.com](mailto:julio.anasco@gmail.com)

## Simulación del juego del ultimátum con inteligencia artificial y sesgos

### Abstract

In this research we have developed different experimental designs of the ultimatum game with artificial intelligence players, including different biases: altruism, envy, and fair-mindedness. These players have supervised and unsupervised methods as well as a biased and unbiased way of thinking, depending on the case. We used reinforcement learning and bucket brigade to program the artificial intelligence players in python, and our method gave us revolutionary rational thought for how strategies are updated after every round. Using these simulations and behavior comparisons, we answered the following questions: Does artificial intelligence reach a perfect sub-game equilibrium in the ultimatum game experiment? How would Artificial Intelligence behave in the ultimatum game experiment if biased thinking were included in it? These analyses showed an important result: artificial intelligence by itself does not reach a perfect sub-game equilibrium as expected, whereas the experimental designs with biased thinking players do quickly converge to an equilibrium. Finally, we demonstrated that the players with envy bias behave the same as the ones with altruistic bias.

**Keywords:** Reinforcement Learning, Bucket Brigade, Homo-economicus, Biased thinking, Nash Equilibrium, Perfect sub-game equilibrium, Pareto Optimum, Artificial Intelligence and Ultimatum game.

### Resumen

En esta investigación se han desarrollado diseños experimentales del juego del ultimátum con agentes inteligentes artificiales con el rol de jugadores, incluyendo distintos sesgos: altruismo, envidia y pensamiento justo. Se ha utilizado aprendizaje por refuerzo y bucket brigade para programar los jugadores en python, nuestro método nos otorga un pensamiento racional evolutivo por como los jugadores actualizan sus posibles estrategias basado en los resultados de las rondas previas. Mediante simulaciones y comparación de comportamientos se han estudiado las siguientes preguntas: ¿Llega la inteligencia artificial a un equilibrio de subjuego perfecto en el experimento del juego del ultimátum? ¿Cómo se comportaría la inteligencia artificial en el experimento del juego del ultimátum si se le incluye un pensamiento sesgado?



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
15/5/2021

Aceptado /  
Accepted:  
09/05/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
15/05/2023



Este análisis exploratorio ha llegado a un importante resultado: la inteligencia artificial por sí sola no llega a un equilibrio de subjugos perfecto. Por otro lado, se demostró que los diseños experimentales de los jugadores con sesgo convergen a un equilibrio rápidamente. Por último, se demostró que los jugadores con sesgo de envidia se comportan igual que los que tienen sesgo de altruismo.

**Palabras clave:** Aprendizaje por refuerzo, Bucket Brigade, Homo-economicus, Pensamiento sesgado, Equilibrio de Nash, Equilibrio de subjuogo perfecto y Óptimo de pareto.

---

## INTRODUCTION

The economists Guth, Schmittberger, and Schwarze were the first who introduced the ultimatum game to experimentation to test human responses. They concluded that humans do not take the strategies that lead to a Nash equilibrium because they are not rational. These findings motivated us to research what would happen in an experiment with rational players. Does artificial intelligence (AI) reach the perfect sub-game equilibrium in the continuous ultimatum game experiment? How would artificial intelligence behave in the ultimatum game experiment if we included biases?

To answer these research questions, we created a continuous ultimatum game experiment with different types of artificial intelligence players. We used two learning methods to program the players and created a distinction between biased and unbiased players. These different methodologies allowed us to study different behaviors and complement this research.

The contribution of this research to the empirical literature encompasses the areas of game theory, experimental economics, behavioral economics, and artificial intelligence. We expect to contribute to the growth of the AI research in the field of economics. The results we obtained can be used to compare human behavior with rational behavior and, furthermore, analyze the equilibrium variants that the experiments of the ultimatum game may have.

The research *Learning to Reach Agreement in a Continuous Ultimatum Game* published in 2008 by Steven de Jong and Simon Yttendaele concluded that continuous-action learning is satisfactory when we are aiming to allow players to learn from a relatively low number of examples. Another research study published by Sanfey in 2003, under the title *The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game*, defined biases that influenced the agents' decision-making in the ultimatum game experiments [17]. He explained that human beings' behavior is far away from the assumption of homo-economicus. Some research studies have created an experiment of the ultimatum game using artificial intelligence players, but ours is the first to include the biases of altruism, envy and fair-mindedness, described by Sanfey, in artificial intelligence players.

On the other hand, Gale, Binmore, and Samuelson published research in 1995 under the



name *Learning To Be Imperfect: The ultimatum game* that specified that the ultimatum game experiments do not reach the theoretical Nash equilibrium because of misconception [8], which also agrees with the research by Guy in 2011, entitled *Decision making with imperfect decision makers*, where the author used artificial intelligence to prove that the rational solution for Player 2 is to have more equitable payoff and to not converge to the Nash equilibrium [11]. Our contribution lies in creating different learning methods in artificial intelligence players to be able to verify or refute these theories.

In section 2 of our research, we expose the methodology that was used to construct the artificial intelligence players of the experimental design. We explain how rational players and biased players were defined. Section 3 details the obtained results for each type of player under different simulations. Section 4 offers conclusions and mentions possible research topics that could emerge from this research.

## METHODOLOGY

### The original ultimatum game

This game is a probabilistic situation in which there are two players; Player 1 (J1) splits an amount of 1 to Player 2 (J2). J1 proceeds to make an offer of how to split this amount defined as  $X \in [0, 1]$ . J2 has to decide to accept or reject the offer. If it is rejected, J1 and J2 will get a payoff equal to 0. If it is accepted, J2 will obtain the value offered by J1.

The original game works in one round, and therefore, there is only one chance to take the right decision. This "right decision" equals a rationality assumption called the Nash equilibrium. The model of this game is better described in Figure 1.

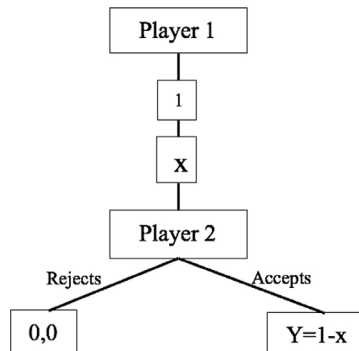


Figure 1. Original Ultimatum Game

Figure 1 tree diagram shows Player 1 and Player 2. The amount to be split is 1 unit and the strategy of Player 1 is represented as  $x$ , where  $x$  takes an interval value of real numbers between 0 and 1. Furthermore, for each value of  $x$ , Player 2 will have a payoff of 0 in case of rejecting or  $1 - x$  in case of accepting. To simplify the nomenclature,  $(1 - x = y)$  is defined as the player payoff.



Economic science establishes that each player, if behaving rationally, must converge to the Nash equilibrium (0,9,0,1). Thus, the academic text *A primer in game theory*, written by Gibbons in 1992, explains that Player 1 always will approach the maximum possible amount for itself and will offer the smallest possible amount to Player 2. Player 2 will accept any value greater than 0, since in any other case it is indifferent between accepting or rejecting the offer [9]. Therefore, to reach the theoretical equilibrium in repeated games, there must be an adjustment such that the player strategies reach Nash equilibrium in 1 round or sub-game cycle. This happens because there is no rational strategy that deviates these payoffs from Nash equilibrium.

### The continuous ultimatum game

In the continuous ultimatum game, Player 1 splits the same amount (0,9,0,1) in N iterations. Since in each round the rational decision remains the same, there is no reason to deviate from the Nash equilibrium value even if there are more rounds. The most optimal decision always remains for Player 1 to select the maximum possible value and for Player 2 to accept any value greater than 0. This statement can be seen by the backward induction process in Figure 2.

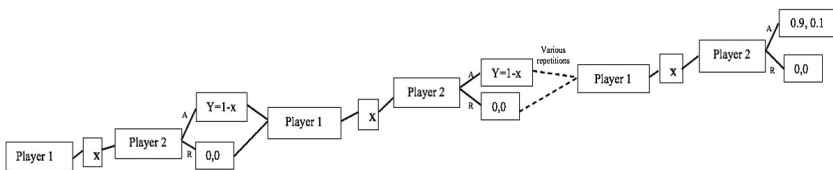


Figure 2. Backward induction of the Ultimatum Game

Figure 2 shows that in each round the same rational decision is made. Therefore, the backward induction process shows that the Nash equilibrium is the same in the sub-games. There are no possible triggering strategies.

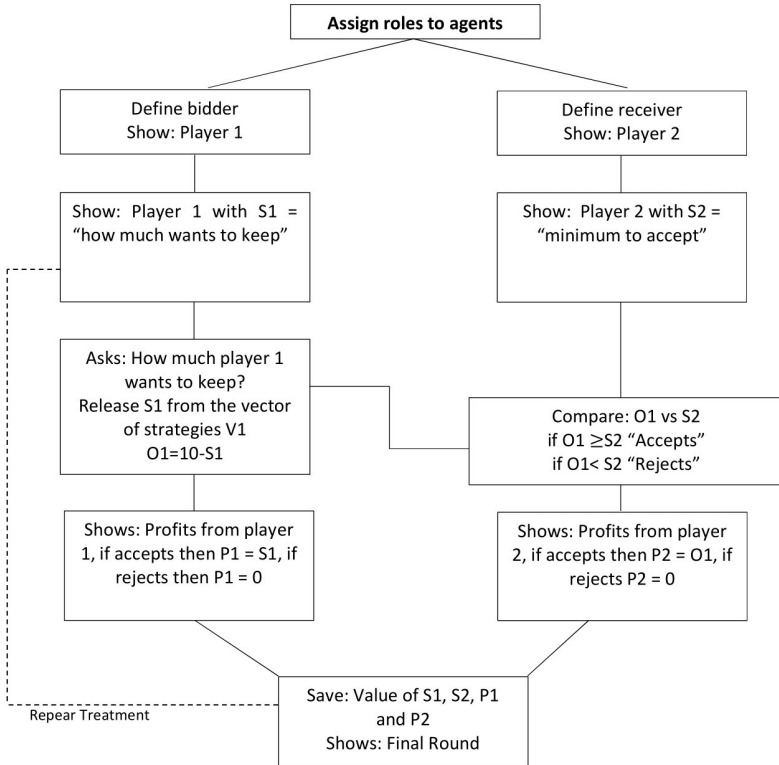
### Experimental design of the ultimatum continuous game

Our experimental design of the ultimatum game is composed of 1000 rounds to ensure that players reach a convergence. We implement 2000 players, 1000 couples of players to generate a large database that allows us to identify a pattern. The value to be split between the two players is 10 units, which will be the same every round until the end of the experiment. The distribution of 10 units will be in integer numbers to facilitate the extraction of our database.

At the beginning of the experiment, each player is assigned a role, Player 1 (bidder) or Player 2 (receiver), and they are matched. The role remains the same until the end of the experiment, and each player remains with the same partner within the whole experiment. All Player 1 strategies are defined by S1 and all Player 2 strategies are S2. In the first round, Player 1 and Player 2 randomly draw an integer from the interval [1, ..., 10], which is contained in vector V1 and V2, respectively, to define the strategies, respectively. Player 2 will accept or reject Player 1's strategy by comparing S1 and S2 so the players



can update their future strategies. The diagram detailing our experimental design is shown in Figure 3. In case Player 2 rejects, both will receive a payoff (0,0). In case Player 2 accepts, Player 2 will get the split proposed by Player 1 ( $S_1, 10-S_1$ ).



**Figure 3.** Ultimatum Game Experimental Design

At the end of this experiment, the strategies of the players should converge to (9,1) according to the economic theory. However, research published by Román Carrillo in 2009, *Cooperación en redes sociales: el juego del ultimátum*, showed this same experimental design with human beings and came to the conclusion that few individuals end up with offered amounts above fifty percent [16]. The ultimatum game played with human players make an output similar to the Nash equilibrium impossible. Human beings do not act rational on the maximization of benefits and endowments. This gives us the premise of the importance of evolutionary rational thought and quantifying bias.

**Pseudo-code of the ultimatum continuous game experiment**

The experimental environment is programmed by defining two players for each round, Player 1 and Player 2, from a list of 2000 players. Each player is matched.  $S_1$  is defined by  $V_1$  and  $S_2$  is defined by  $V_2$ . Then,  $O_1 = 10 - S_1$  is defined. Strategies function: each player chooses a strategy from the vector  $V_1$  or  $V_2$ . Comparison function: Player 2 compares  $O_1$  vs  $S_1$  and makes a decision: if  $O_1 \geq S_2$ , Player 2 accepts; if  $O_1 < S_2$ , Player 2 rejects.

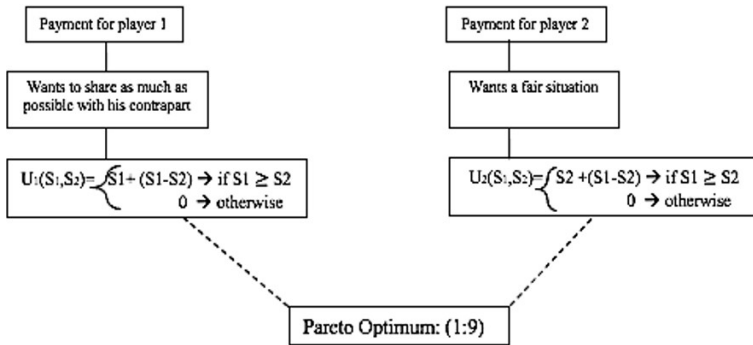


Payoff function (payoff Player 1 = P1 and payoff Player 2 = P2): If Player 2 accepts, P1 = S1 and P2 = O2; if Player 2 rejects, P1 = 0 and P2 = 0. Saves value of S1, S2, P1, and P2. The game is repeated 1000 times after the strategies are chosen.

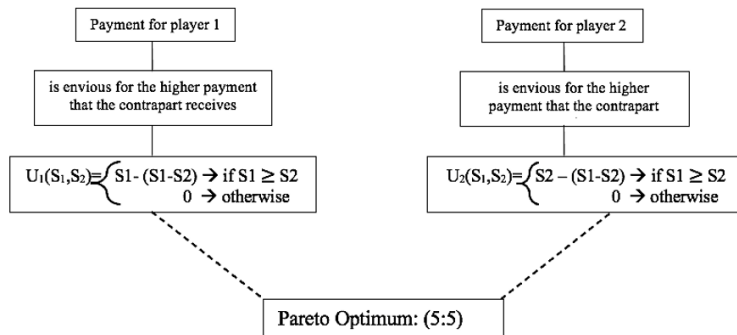
**Behavioral economics**

Our players update the strategies in five different games for which three of them are set by three types of biases: altruism, envy, and fair-mindedness. We considered it important to include these biases in our experimental design to enrich our research. Sanfey's research *Social Decision-Making: Insights from Game Theory and Neuroscience Science* in 2007 demonstrated that some biases most prevalent in the ultimatum game experiment are altruism, envy and fair-mindedness [18].

To include these biases in our experimental design, it was necessary to create a function called welfare function that allows our Players 1 and Players 2 to evaluate the payoff based on the bias assigned. The payoffs versus the payoffs of the partners (see figure 6, 7 and 8). In this way, we were able to create a new metric called "welfare," which allowed us to further the analysis of our research.

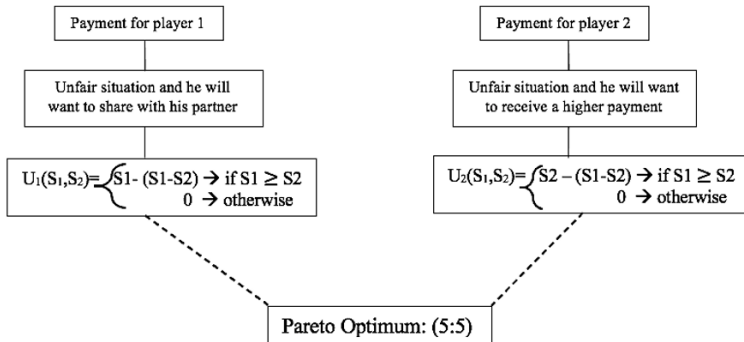


**Figure 6.** Altruistic Player Diagram



**Figure 7.** Envious Player Diagram





**Figure 8.** Fair-Minded Player Diagram

The purpose is to measure what occurs to each player's strategies, payoffs, and welfare when they behave exclusively altruistically, enviously, or fairly. These results were compared with unsupervised players without bias (rational players fulfill all economic assumptions for a perfect equilibrium in sub-games) and supervised players without bias (rational players always converge to perfect equilibrium in sub-games).

The players' behavior in our experiment are defined as follows:  $a$  is the payoff of Player 1 and  $b$  is the payoff of Player 2:

**Altruistic**

*if  $a < b$*

$$Welfare = a + (b - a)$$

In this bias, the players maximize the welfare when the partner has a payoff value greater than itself. Its welfare is the payoff it receives plus the surplus from the partner.

**Envious**

*if  $a < b$*

$$Welfare = a - (b - a)$$

When the player has a lower payoff than its partner, its welfare decreases. Its welfare is the payoff that each player receives minus the other player surplus.

**Fair-minded**

*If  $a < b$ ,*

$$Welfare = a - (b - a), \text{ if } a > b,$$

$$Welfare = a - (a - b)$$

Each player finds it unfair to have unequal payoff. If Player 1's payoff is higher than Player 2's payoff, Player 1's welfare goes down, but if the payoff is higher than Player 2's payoff, the same thing happens. Each player maximizes the welfare with a fair split.



Figures 6, 7 and 8 detail how biases work in the experiment defined above. It is important to mention that, when there is a biased behavior, the expected equilibrium responses reach a point known as the pareto optimum.

### **Artificial intelligence in our experimental design**

Artificial intelligence is defined as a set of algorithms that seek to mechanically recreate certain behaviors. Our research is not the first to use evolutionary algorithms in an ultimatum game experiment; indeed, the research *Learning to Reach Agreement in a Continuous Ultimatum Game* by de Jong et al. implemented players with continuous action learning automata in a large number of random pairwise games in order to establish a common strategy [5]. However, it is the first to incorporate the aforementioned biases in the artificial intelligence players.

In our experimental design, we use the reinforcement learning mechanism bucket brigade. This mechanism is defined by a chain of buckets, where in every round the buckets fill with more information that will converge to the best strategy. The first-round players randomly choose an integer number between 1 and 10 from a vector V1 and V2 that contains all these possible strategies. After playing the first round, the vector of strategies updates by how effective the strategies were. For example, if Player 1 proposes to keep 9 of the 10 units to be split and Player 2 accepts that proposal, the player will add 9 times the strategy 9 at the vector V1 and Player 2 will add 1 time the strategy 1 at the vector V2. This method favors the strategies that pay best, guaranteeing a reinforcement learning and allowing us to have the player with rational evolutionary learning, a behavior similar to how human beings play in real life.

We created two different types of algorithms to extend our analysis. The first algorithm follows the supervised learning method which has an adjustment, a fixed target point for the players to update the strategy vectors to reach the Nash equilibrium. The second, known as unsupervised learning, is for players to update the strategy vectors using the bucket brigade mechanism and to learn from the previous strategies until reaching a convergence that they consider the best strategy to play.

We created players with the supervised learning method and with the unsupervised method, shown in figures 4 and 5. Also, we created players with the unsupervised learning method and with three different types of biases: altruism, envy, and fair-mindedness. Consequently, these players do not work with an adjustment, and therefore, players are expected to take trigger strategies.

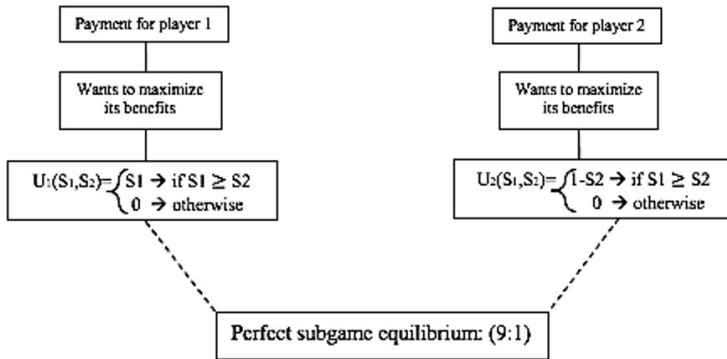


Figure 4. Non-biased Supervised player Diagram

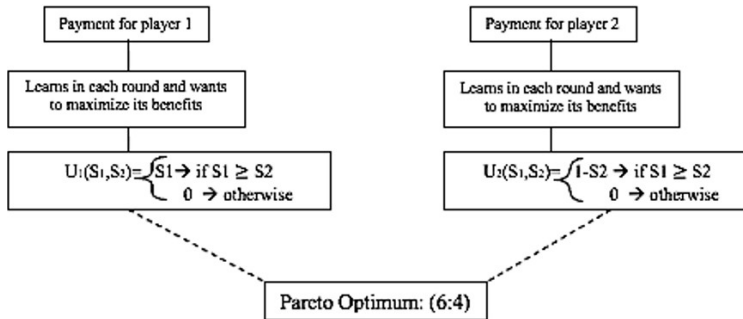


Figure 5. Non-Biased Unsupervised Player Diagram

**Pseudo-code for the creation of class players**

Define each player as an object with a role, bidder = Player 1 and receiver = Player 2. Initial parameters for each player: role, S1 defined by V1, S2 defined by V2, V1 [1,10], V2 [1,10], payoffs, accumulated payoffs, welfare, and accumulated welfare. Create a function to choose the strategy: make a random choice from V1 and V2. Comparison function: Player 2 compares O1 vs S2. If O1 >= S2, Player 2 accepts. If O1 <= S2, Player 2 rejects. Each player's profits are displayed. Player 1: if Player 2 accepts, then P1 = S1; if Player 2 rejects, then P1 = 0. Player 2: if accepts, then P2 = O1; if rejects, P2 = 0. Saves value of S1, S2, P1 and P2. Shows: final round. The treatment is repeated, and each player accumulates the payoff or welfare at the end of each round. a is Player 1's payoff and b is Player 2's payoff, detailed below.

**Pseudo-code of the supervised learning without bias**

Define each player with the previous parameters. Strategy update function: as long as Player 1's payoff >= 9, Player 1 adds n times the strategy n at the vector V1. As long as Player 2's payoff <= 1, Player 2 adds n times the strategy n at the vector V2. The players update the strategies without a bias.



### ***Pseudo-code of the unsupervised learning without bias***

Define each player with the previous parameters. If Player 2 accepts,  $O1 \geq S2$ , and each player adds  $n$  times the strategy  $n$  at the vector  $V1$  or vector  $V2$ , respectively. The players update the strategies without a bias.

### ***Pseudo-code of the unsupervised learning with altruism***

Henceforth  $a$  is Player 1's payoff and  $b$  is Player 2's payoff, detailed below.

Define each player with the previous parameters. Altruistic bias function: if  $a < b$ , the player obtains a *welfare* =  $a + (b - a)$ ; otherwise, player *welfare* =  $a$ . Strategy update function: the player updates the strategy  $n$  times the strategy  $n$  that gives a *welfare*  $> 0$ . Welfare accumulation function: the player saves the *welfare* and accumulates it.

### ***Pseudo-code of the unsupervised learning with envy***

Define each player with the previous parameters. Envy bias function: if  $a < b$ , the player obtains a *welfare* =  $a - (b - a)$ ; if not, player *welfare* =  $a$ . Strategies update function: the player updates the strategy  $n$  times the strategy  $n$  that gives a *welfare*  $> 0$ . Welfare accumulation function: the player saves the *welfare* and accumulates it.

### ***Pseudo-code of the unsupervised learning with fair-mindedness***

Define each player with the previous parameters. Fair-minded bias function: if  $a < b$ , the player obtains a *welfare* =  $a - (b - a)$ ; or, if  $a > b$ , obtains a *welfare* =  $a - (a - b)$ . If not, the *welfare* =  $a$ . Strategies update function: the player updates the strategy  $n$  times the strategy  $n$  that gives a *welfare*  $> 0$ . Welfare accumulation function: the player saves the *welfare* and accumulates it.

## **Data collection**

Our data collection is a method that combines experimental design with artificial intelligence programming. Data were generated after running the simulations and saving the generated data.

# **RESULTS**

## **Ultimatum game with players without bias (supervised learning)**

Figures 9 and 19: The strategies and payoffs made by Player 1 and Player 2 converged to a perfect sub-game equilibrium of (9,1). Player 2 tended to accept any offer greater than zero, while Player 1 repeatedly continued to offer as little as possible, as the theory stipulated. However, there were rounds in which Player 2 declined the offer, waiting for a change in Player 1's strategy. In this case, the players ended up ratifying the perfect sub-game equilibrium.

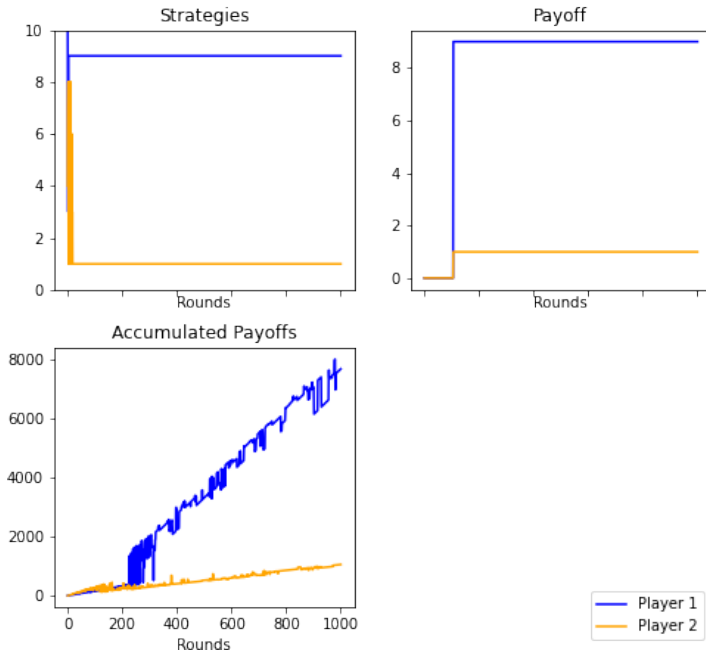


Figure 9. Supervised Player. 1000 rounds. Mode

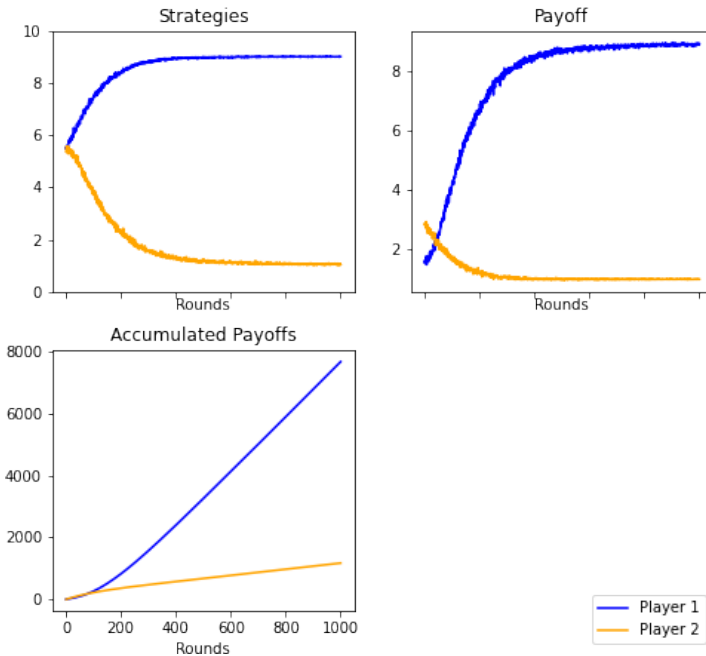


Figure 19. Supervised Player. 1000 rounds. Average



Figure 14: The evolution of the strategies is shown in a histogram where in the first round the players randomly choose a strategy, and after 500 rounds, Player 1 and Player 2 play for strategies 9, but in round 1000 each player converges to the Nash equilibrium.

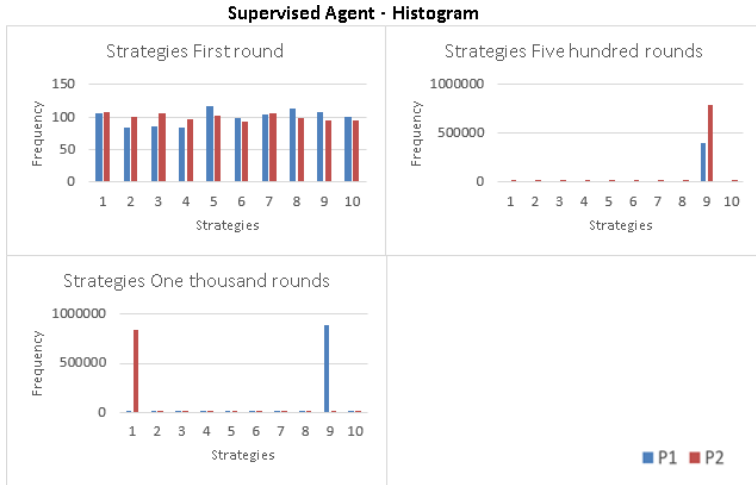


Figure 14. Supervised Player. Histogram

### Ultimatum game with players without bias (unsupervised learning)

Because the players have bucket brigade learning and memory, they have a different maximization environment. Player 1 and Player 2 strategies evolve and converge for the strategies that give them the best payoffs.

There was a more concurrent rejection of the minimum offers. This simulation has been repeated multiple times and has been found to be statistically valid. Artificial intelligence by itself (without supervision) reaches a different equilibrium than the Nash, a pareto optimum, against our expectations.

Figures 10 and 20: Unlike the previous experimental design, the results changed significantly.

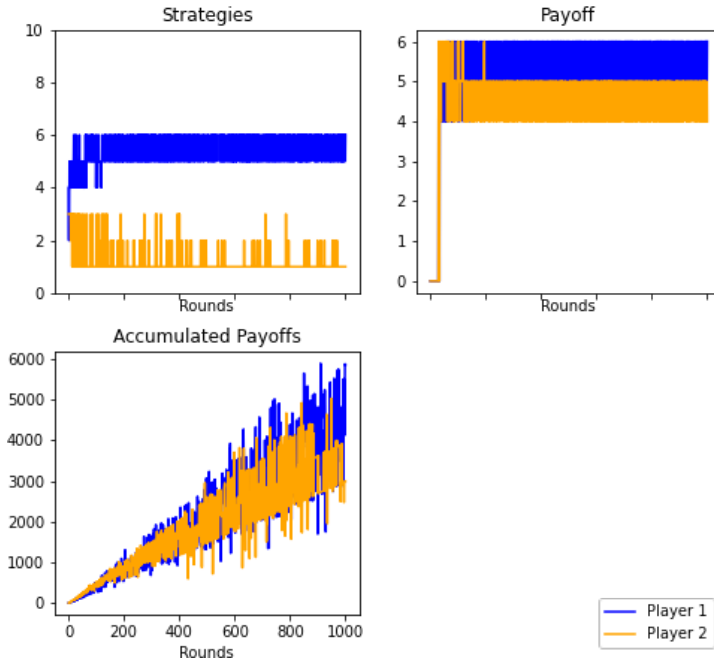


Figure 10. Unsupervised unbiased Player. 1000 rounds. Mode

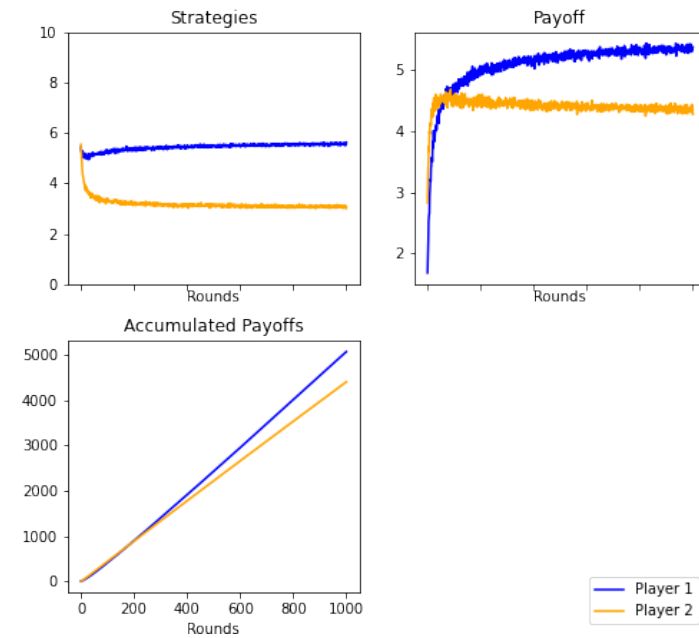


Figure 20. Unbiased Player. 1000 rounds. Average



The players do not converge to a perfect sub-game Nash equilibrium, but to a pareto optimum. In this situation, artificial intelligence behaves similarly to a human being. A balance is reached between (6,4) and (5,5).

Figure 15: The evolution of the strategies is shown in a histogram where in the first round the players randomly choose a strategy, and after 500 rounds Player 1 and Player 2 play for strategies close to 5, but in round 1000 Player 1 converges more for a strategy close to 5 and Player 2 for strategies lower than 5.

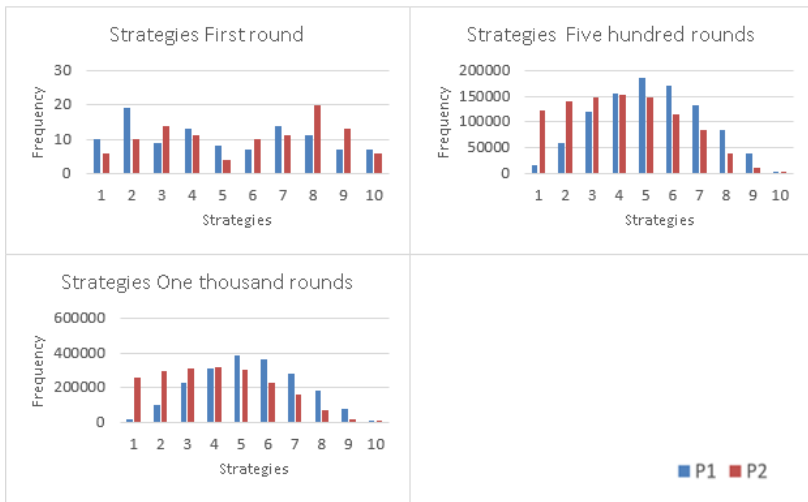


Figure 15. Unbiased Player. Histogram

Trigger strategies emerged. Player 1 made increasing offers. The roles changed and now it was Player 2 who had the greatest power in deciding the appropriate offer to maximize the benefits.

### Ultimatum game with altruism bias (unsupervised learning)

Unlike the first two experimental designs, this one is characterized by the fact that the players have a bias that conditions them. According to the designed algorithm, the players tended to keep as little as possible so that the partner received the greatest benefit.

Figures 11 and 21: In this case, the results converge to a pareto optimum of (1,9). Player 2 continually rejected offers by Player 1 that were considered high, so Player 2 eventually ended up delivering lower offers. Being altruistic generates a result totally opposite to the Nash equilibrium.



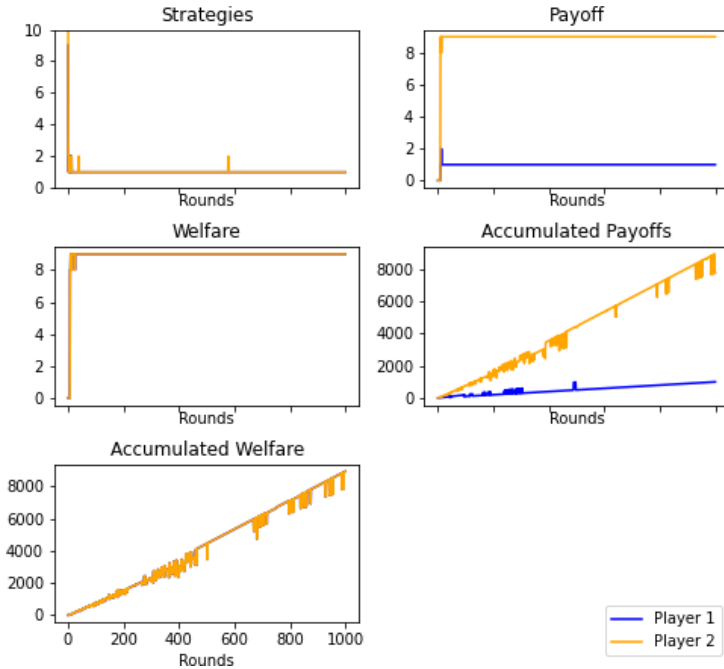


Figure 11. Altruistic Player. 1000 rounds. Mode

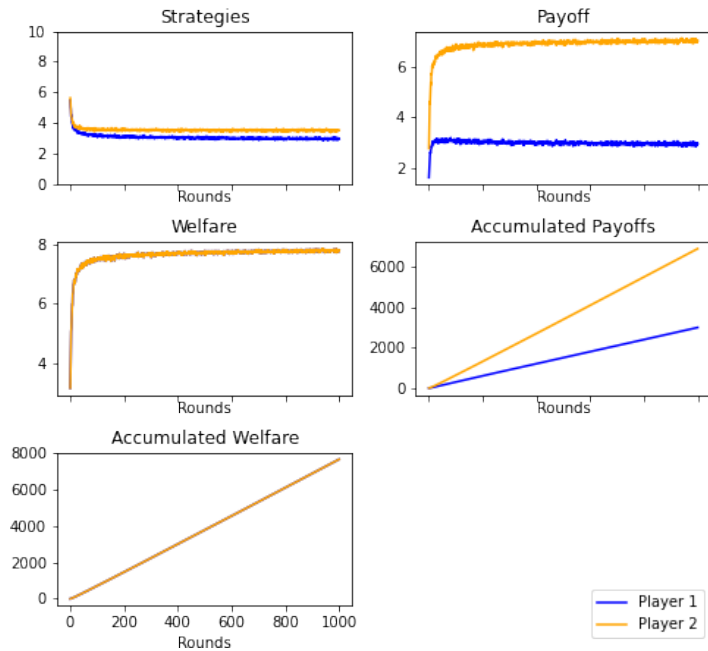


Figure 21. Altruistic Player. 1000 rounds. Average



Figure 16: The evolution of the strategies is shown in a histogram where in the first round players play randomly, and after 500 rounds Player 1 and 2 play for strategies close to 1. In round 1000 each player converges more for strategies close to 1, keeping the tendency.



Figure 16. Altruistic Player. Histogram

### Ultimatum game with envious bias (unsupervised learning)

The possibility of higher rewards was found biased due to the perception of an envious environment. It was more likely to have a reject strategy between rounds. The figure below shows the results for this case.

Figures 12 and 22: It is denoted that the players converged to a pareto optimum of (5,5). Player 2 continually declined minimum offers until Player 1 changed his strategy. Player 1 and Player 2 eventually settled for that combination that does not generate envy. The players reached a point where neither was envious of the other.

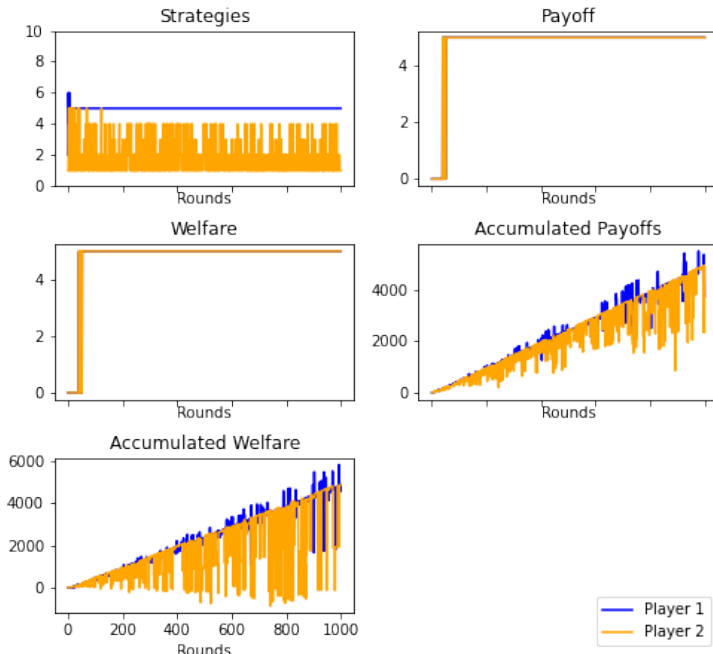


Figure 12. Envious Player. 1000 rounds. Mode

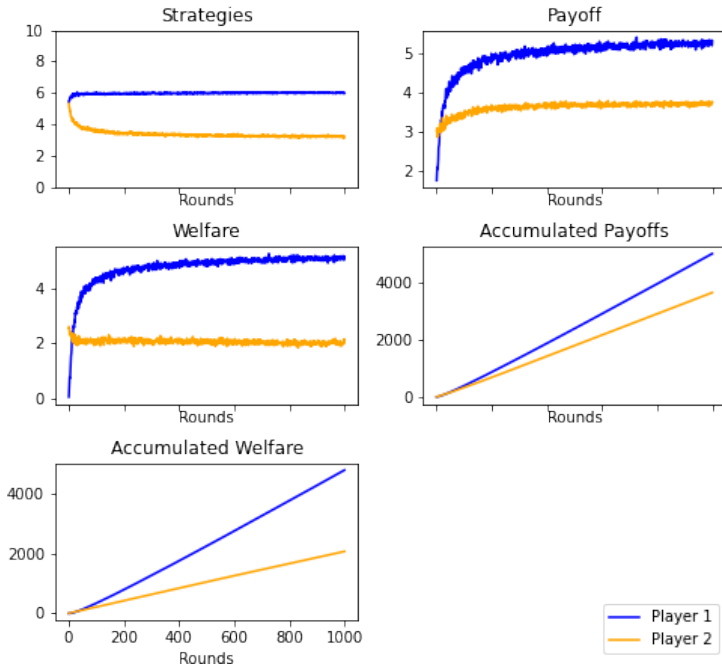


Figure 22. Envious Player. 1000 rounds. Average



Figure 17: The evolution of the strategies is shown in a histogram where in the first round players play randomly, and after 500 rounds Player 1 plays for strategies close to 5 and 2 for any strategies lower than 5. In round 1000 Player 1 plays strategy 5 with more frequency than others, and Player 2 plays more strategies that are lower than 5.

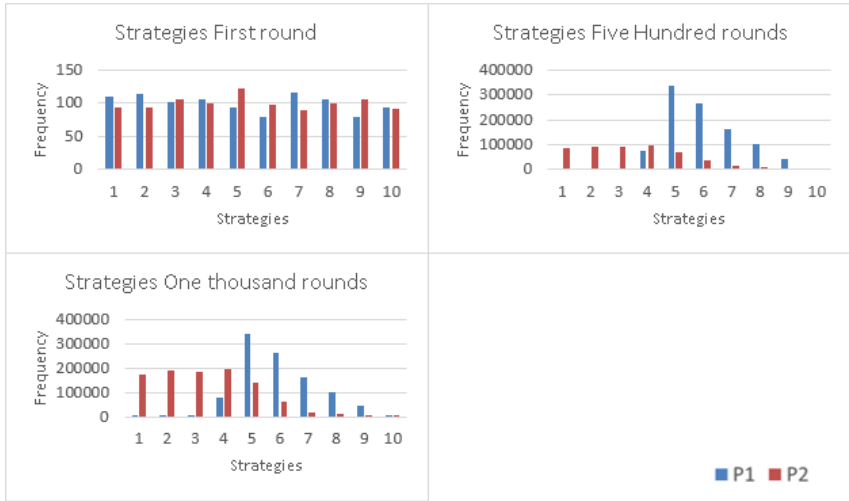


Figure 17. Envious Player. Histogram

**Ultimatum game with fair-minded bias (unsupervised learning)**

Figures 13 and 23: Fair-minded bias allowed players to maximize the welfare by having fair payoffs between rounds. The figure shows these results. They reached a pareto optimum of (5,5). Player 1 and 2, despite not maximizing their payoffs, maximized their welfare when the benefits were equal. Player 2 continually rejected minimum and maximum offers, and Player 1 delivered offers with increasingly fair pay.

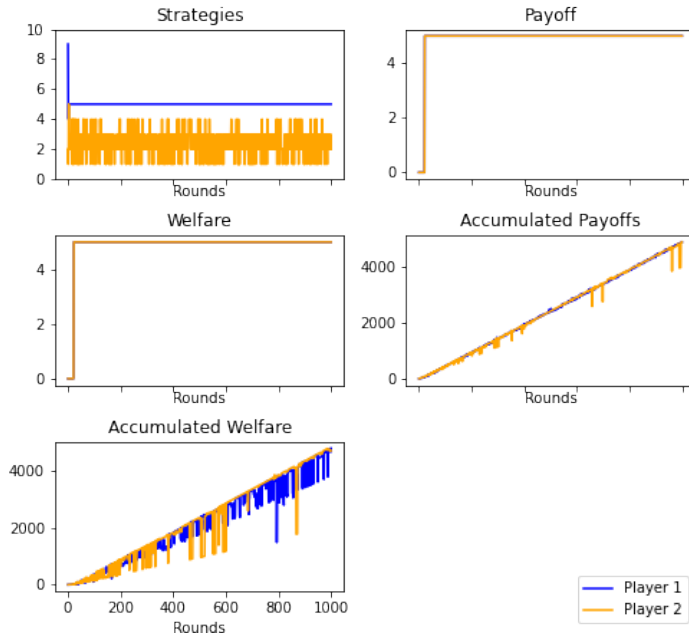


Figure 13. Fair-Minded Player. 1000 rounds. Mode

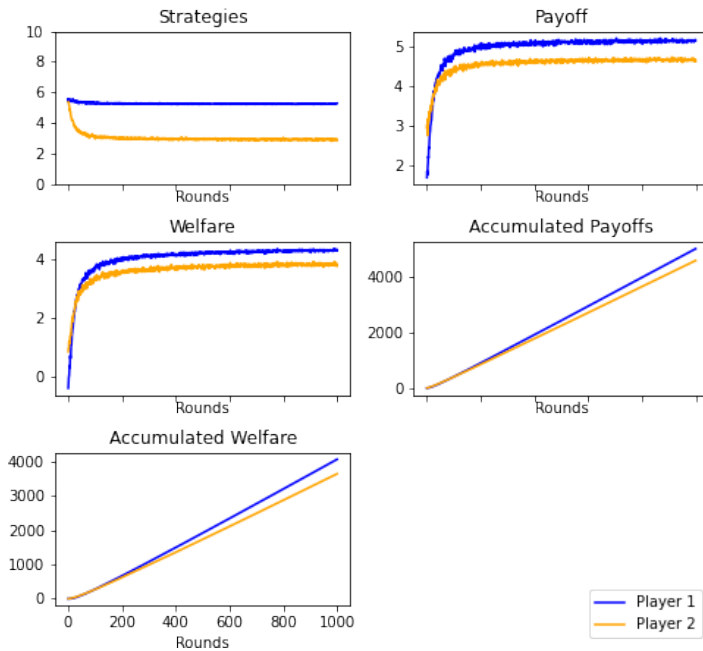


Figure 23. Fair-minded Player. 1000 rounds. Average



Figure 18: The evolution of the strategies is shown in a histogram where in the first round players play randomly, and after 500 rounds Player 1 converges for strategies close to 5, and Player 2 plays for strategies lower than 5. In round 1000 Player 1 converges more for the strategy 5, and Player 2 for strategies lower than 5.

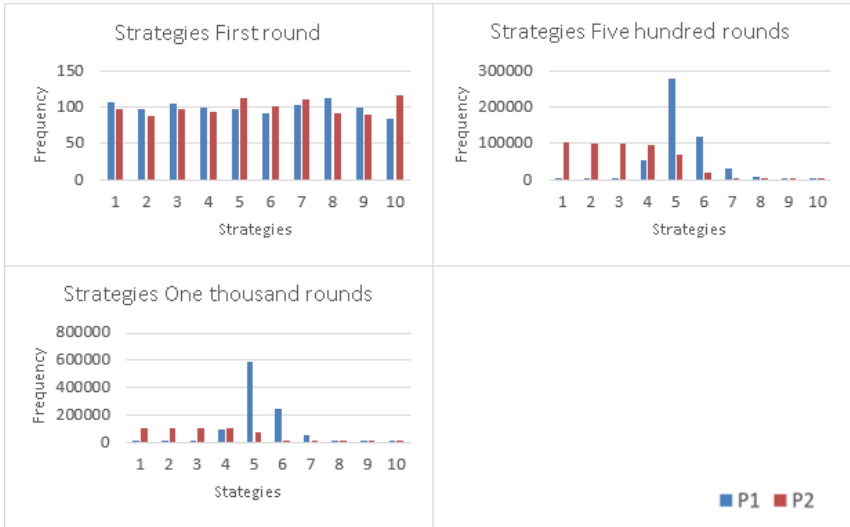


Figure 18. Fair-minded Player. Histogram

## CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The most important conclusion of this research is that, contrary to expectations, unbiased artificial intelligence with unsupervised learning does not lead players to the Nash equilibrium. The research *Learning To Be Imperfect* by Gale, Binmore, and Samuelson explains that this happens because artificial intelligence players learn between rounds [8]. In our experiment, Player 2 discovers that in order to maximize the future profit, it has to give up the current gains. This research shows that artificial intelligence alone (without supervision) includes trigger strategies that lead to a convergence of a pareto optimum, not a Nash sub-game equilibrium.

Also, in the research *Learning to Reach Agreement in a Continuous Ultimatum Game*, rational evolutionary learning is the main explanation of how humans play and make decisions in real life. Humans like artificial intelligence based on reinforcement learning, in our research bucket brigade, upgrade the strategies based on the results of the previous rounds [5]. This is why our unbiased unsupervised players play similarly to how humans play a continuous ultimatum game, and it implies the importance and relevance of studying how artificial intelligence based on reinforcement learning can be used to predict how human beings act in particular events.



On the other hand, our results show that biased artificial intelligence quickly converges to an equilibrium point. One particular case gave us an important result, where the envy bias ended up bringing players to the same equilibrium as fair-minded bias. This happens because the payoff (5,5) is the only point at which players are not envious, so they behave fairly.

Finally, artificial intelligence with supervised learning converges in a matter of a few rounds to the Nash equilibrium (9,1), almost instantaneously. This can be explained by the fact that this method is programmed with an adjustment that pushes the players to equilibrium of perfect sub-games. As players know where to go, they update the strategies to reach this point. We include the publication of Gale, Binmore, and Samuelson when mentioning that the learning method of the players influences the possible strategies [8].

This research could be extended by using combinations between different types of players to identify new behaviors. Also, degrees of bias could be added to measure what would happen if the player behaved, for example, doubly envious. The experimental design could be altered with a change of roles for the players as they play. It is even possible to establish different models of equilibrium, macroeconomics, microeconomics, and others with the help of players with artificial intelligence.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We thank ACI *Avances en Ciencias e Ingenierías* for the opportunity to publish this research. We are hopeful to contribute to further research that can innovate science and the way of thinking. We also thank Universidad San Francisco de Quito USFQ for allowing the development of this research.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Julio Añasco: research administration, methodology design, software development, writing and draft review; Bryan Naranjo and Pamela Proaño: elaboration of figures, validation and verification of results, software development, writing and draft review; Anastasia Vasileuski: software development, writing original draft and literature review. Edited by Julio Añasco y Pamela Proaño.

## REFERENCES

- [1] Sanfey, A., Rilling, J., Aronson, J., Nystrom, L., & Cohen, J. (2003). The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game, (2003). *Science*, 300(5626), 1755-1758. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1082976>
- [2] Gale, J., Binmore, K. & Samuelson, L. (1995). Learning to be imperfect: The ultimatum game. *Games and economic behavior*, 8(1), 56-90. doi: [https://doi.org/10.1016/S0899-8256\(05\)80017-X](https://doi.org/10.1016/S0899-8256(05)80017-X)
- [3] Guy, T. V., Kárný, M., & Wolpert, D. H. (Eds.). (2011). Decision making with imperfect decision makers (Vol. 28). *Springer Science Business Media*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24647-0>
- [4] Gibbons, R. (1992). A primer in game theory. Pearson Academic.
- [5] Román Carrillo, J. (2009). *Cooperación en redes sociales: el juego del ultimátum*. [Undergraduate thesis, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/5838#preview>
- [6] Sanfey, A. (2007). Social Decision-Making: Insights from Game Theory and Neuroscience. *Science*, 318(5850), 598-602. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1142996>
- [7] De Jong, S., Uyttendaele, S. & Tuyls, K. (2008). Learning to reach agreement in a continuous ultimatum game. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 33, 551-574. doi: <https://doi.org/10.1613%2Fjair.2685>



## Proceso editorial

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible.

Asegúrese de revisar el Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación para conocer lo que publicamos.

Lea nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría.

Todos los autores deben cumplir con los requerimientos de autoría establecidos de la política de Requisitos de Autoría de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías. Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan estos requisitos puede ser mencionados en los Agradecimientos.

El Autor para correspondencia debe ingresar su identificador único ORCID al momento del envío del manuscrito (óptimamente, todos los doctores del manuscrito deberían contar su propio ORCID). +Info sobre ORCID.

Los nombres de los autores se publicarán exactamente como aparecen en el manuscrito. Por favor revise la información con cuidado para asegurarse de que es correcta.

**ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** recibe manuscritos que presentan información original y la evaluación de los manuscritos se realiza a través de un proceso de revisión por pares (*peer-reviewed*) que toma en consideración una determinación objetiva de la robustez científica y metodológica, no en factores subjetivos como "impacto" o "interés".

Revisar los criterios de publicación de la revista y nuestras políticas del proceso de evaluación por pares en el siguiente enlace:

<http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

Para la organización de los artículos y comunicaciones, la revista se divide internamente en tres secciones:

Sección A: Ciencias Exactas y Físicas

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Sección C: Ingenierías.

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías se adhiere a los lineamientos de autoría de la ICMJE. Revisa más detalles sobre los requisitos de autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

### DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista **ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible. Asegúrese de revisar el Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación, nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about>

La revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías publica contribuciones en español e inglés, todas son sujetas a un proceso de revisión por pares, y se pueden enmarcar en una de las siguientes categorías:



**Artículo:** Un manuscrito que reporta conclusiones substanciales para el entendimiento de un problema, debiendo ser actualizado y exhaustivo en sus análisis y conclusiones, e incluir el conjunto completo de datos empíricos que soportan las ideas expuestas (se incluyen revisiones sistemáticas de la literatura y meta-análisis). Estos manuscritos usualmente tienen más de 2000 palabras y no hay límite máximo de palabras, figuras o tablas. Estos manuscritos deben tener divisiones con subtítulos (ver sección Organización del manuscrito).

**Comunicación:** Corresponde a un reporte conciso de un tema de investigación específico destinado a la presentación rápida de resultados novedosos pero de interés puntual. El tipo de información reportada es flexible, y puede incluir manuscritos que prueban nuevas metodologías, que describen observaciones de historia natural, o que presentan datos empíricos puntuales y novedosos. Estos manuscritos usualmente tienen menos de 2000 palabras y pueden incluir máximo tres tablas y tres figuras. El texto de estos manuscritos no tiene divisiones (ver sección Organización del manuscrito).

Ciertos manuscritos podrían ser reclasificados entre Artículos y Comunicaciones a discreción de los Editores de la revista y con el permiso del autor.

## PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

**Formato de archivo.** Para el envío inicial, los manuscritos pueden estar en cualquiera de los siguientes formatos: DOC, DOCX., RTF, o PDF.

Si utiliza Mendeley u otro paquete para sus referencias, debe transformar los campos de Mendeley en texto simple.

Se recomienda que los manuscritos que contengan ecuaciones sean producidos en LaTeX. Manuscritos producidos en LaTeX deben ser enviados en formato PDF (si el manuscrito es aceptado, se le solicitará el archivo \*.TEX).

**Tipo de letra.** Times de 12 puntos

Los encabezados deben ir en mayúsculas y centrados (aquellos descritos en la sección Organización del manuscrito).

En caso de incluir subtítulos adicionales a los encabezados, se los colocará en negrillas y con estilo de oración (primera letra en mayúscula y el resto en minúsculas).

El resto del texto no debe tener ningún tipo de formato adicional, excepto colocar palabras en negrillas y en cursiva. No usar tabulaciones, diferentes tamaños de letra, numeración o estilos para subtítulos, etc.

**Diseño de página.** Alineación a la izquierda (no justificado), textos a espacio seguido, hojas tamaño A4, márgenes de 2,5 cm a cada lado.

**Encabezados.** Los encabezados principales se especifican en la sección Organización del manuscrito. Adicionalmente puede haber hasta dos niveles más de subtítulos.

**Números de página.** Todas las páginas deben estar numeradas de manera secuencial en la esquina inferior derecha.

**Notas al pie.** No se debe colocar notas al pie, pues toda la información debe estar en el texto principal o en las referencias.

**Abreviaciones.** Defina las abreviaciones en la primera vez que las usa en el texto (incl. acrónimos, acortamientos, abreviaturas, y siglas).

Mantenga al mínimo el número de abreviaciones. No utilice abreviaciones no estandarizadas al menos que las utilice más de tres veces en el texto.

**Formato de referencias.** Siga el estilo APA (6a edición). Revise las directrices para citas y referencias.

**Ecuaciones.** Manuscritos que contengan ecuaciones se recomienda sean producidos con LaTeX.

Utilizar MathType para generar y desplegar ecuaciones, caso contrario también es adecuado Equation Editor.

Numere las ecuaciones al lado derecho entre paréntesis. Por ejemplo:  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$  (1)

No utilice MathType o Equation Editor para colocar signos de variables, símbolos griegos, u operadores matemáticos en el texto general del manuscrito. En estos casos, inserte los símbolos como texto normal con los valores Unicode (hex) correctos.

**Lenguaje.** Escriba el texto y las leyendas de tablas y figuras de manera clara y sin ambigüedades, enfocado en una audiencia internacional. Siga las normas de escritura académica establecidas en el campo al cual corresponde el manuscrito.

Manuscritos en Inglés pueden usar Inglés Americano o Inglés Británico pero de manera consistente.

Manuscritos en Español deben seguir las recomendaciones de la Real Academia de la Lengua Española (con excepción del uso de tilde en "et al.>").

**Medidas, fechas y hora.** Use el Sistema Internacional de Unidades. Puede usar unidades específicas a la disciplina que no son SI solo cuando estas han sido ampliamente adoptadas en dicho campo científico. Coloque un espacio entre el número y el símbolo de la unidad, no coloque un punto al final del símbolo de la unidad, ejemplo: 4 km

Las fechas deben indicarse como Día Mes Año. No abrevie el mes. Ejemplo: 12 de febrero 2015, 14 January 2013

La hora debe seguir el formato de 24 horas, ejemplo: 13h00

**Numeración y porcentajes.** Escribir los números del 1 al 9 en palabras, a menos que sean unidades.

No incluya un espacio entre el valor y el símbolo de porcentaje, ejemplo: 45%

**Coordenadas geográficas.** Expresar las coordenadas geográficas en grados decimales. No reporte coordenadas en grados-minutos-segundos o en UTM. Incluya el sistema de referencia geodésico.

Use N/S para denotar latitud y E/W para denotar longitud, independiente el idioma del manuscrito.

### Nomenclatura

**Nombres científicos de especies** se escriben en cursiva. Escriba el género y la especie de manera completa en el título del manuscrito y la primera vez que mencione al organismo en el texto, abstract, resumen, y leyendas de tablas y figuras. Así mismo, escriba el género completo cada vez que lo mencione por primera ocasión en un párrafo o cuando inicie una oración. Luego de la primera mención en el párrafo se puede abreviar género utilizando sólo la primera letra.

**Genes, mutaciones, genotipos o alelos** se escriben en cursiva. Utilice el nombre recomendado consultando la base de datos apropiada de nomenclatura genética. Usualmente es recomendable indicar los sinónimos para el gen la primera vez que aparece en el texto. Los prefijos de genes tales como los usados para oncogenes o la localización celular deben mostrarse en caracteres de tipo romano (e.g., v-fes, c-MYC).

**Compuestos químicos** deben tener un nombre sistemático correcto, siguiendo los convenios de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Una vez que se ha proporcionado el nombre sistemático, es aceptable definir un nombre común o un acrónimo y para esto ser utilizado para el resto del texto, tablas y figuras. Los nombres generados por ChemDraw u otro software a partir de fórmulas gráficas introducidas deben ser verificados para guiones adicionales y otras desviaciones de las convenciones de la IUPAC. Los nombres sistemáticos o genéricos deben usarse para productos comerciales en lugar de nombres patentados o de marca registrada.

**Sustancias farmacéuticas** deben mencionarse bajo la Denominación Común Internacional (DCI), o INN (International Nonproprietary Name)

**Evidencia en estudios biológicos.** Si su manuscrito utiliza datos de organismos biológicos, se debe declarar explícitamente la disponibilidad de la evidencia bajo una de las siguientes opciones:

Especímenes voucher depositados en colecciones científicas abiertas al público (es necesario indicar el nombre de la colección y los números de catálogo de los especímenes).

Secuencias de aminoácidos o genes depositadas en GenBank o un repositorio equivalente (indicando el nombre del repositorio y los códigos de acceso).

Fotografías, grabaciones de audio o vídeo enviadas como parte de las figuras o como material suplementario del manuscrito.

Fotografías, grabaciones de audio o vídeo que han sido depositadas en un repositorio institucional o público (por ejemplo, Macaulay Library, o xeno-canto), para las cuales es necesario indicar el nombre del repositorio y citar el registro usando el formato de citación APA para recursos electrónicos e incluirlo en la sección de Referencias.

La colección de datos de organismos biológicos debe realizarse de acuerdo a la legislación nacional e internacional vigente. Es imprescindible que los permisos de investigación y colección otorgados por las autoridades competentes se indiquen en la sección de Agradecimientos del manuscrito.

**Datos y códigos.** Si su manuscrito se basa en análisis de datos sin procesar (raw data) o códigos, estos deben estar a disposición de los revisores. Por favor, envíelos por una de las siguientes vías:

- Como enlaces a un repositorio donde los datos son accesibles y citados en el manuscrito. Este repositorio puede ser institucional, comercial o de acceso abierto (por ejemplo, figshare o Dryad)
- Como archivos de Material Suplementario.

Si el manuscrito es aceptado, los datos deberán hacerse públicos de tal forma que los datos estén disponibles públicamente para todos los investigadores interesados.

Sin embargo, entendemos que pueden haber restricciones éticas y legales que prohíban la apertura de los datos, por lo que cuando exista legislación o marcos éticos locales que llamen a evitar o limitar la liberación de datos, los autores deben dejar estas limitaciones claras al momento del envío de su manuscrito (en la sección de Comentarios para el editor/a).

Posibles excepciones a la disponibilidad de datos públicos incluyen: datos que no pueden ponerse a disposición del público pues comprometería la confidencialidad o la privacidad del participante; o datos que de ponerse a disposición pública podrían presentar alguna amenaza, como revelar las ubicaciones de depósitos fósiles, especies en peligro de extinción, etc.

Si los datos sin procesar o los códigos pertenecen a terceros y Ud. no tiene permiso para publicarlos, debe presentar la fuente y la verificación del permiso de uso de los datos así como la Información de contacto donde un investigador interesado tendría que aplicar para obtener acceso a los datos pertinentes, en la sección Materiales y Métodos. Sin embargo, tenga en cuenta que los autores son responsables de asegurarse de que los datos estarán disponibles a partir de la publicación, de la misma manera que los autores obtuvieron los datos.

## ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO

1. La primera página del manuscrito debe incluir las siguientes partes, cada una separada por una línea:

- **Título del artículo:** En negrillas, con máximo 300 caracteres, debe ser específico, descriptivo, conciso y comprensible para los lectores fuera del campo. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas. Puede dividirse en título y subtítulo, separados por el signo de puntuación dos puntos (:). Para revisiones sistemáticas o meta-análisis, el subtítulo debe incluir el diseño del estudio.
- **Título abreviado:** En negrillas, con máximo 100 caracteres, describe el tópico de estudio. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas.
- **Nombres de los Autores:** Presente los nombres de los autores tanto en la primera página del manuscrito

como en la plataforma de la revista. Para cada autor debe incluir el primer nombre, el segundo nombre (o su inicial, si la usa) y los apellidos. Los autores se separan entre sí por comas (no colocar y, and, &).

- **Afiliaciones:** Cada autor de la lista debe tener una afiliación. La afiliación debe incluir al menos el nombre de la organización o universidad y su ubicación. Las afiliaciones se asociarán con los autores por medio de superíndices numéricos. Múltiples afiliaciones por autor se separarán en líneas diferentes y con superíndices propios. Se marcará al autor responsable del manuscrito con un asterisco junto a los superíndices, asociado con la frase "Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail:" seguido por el correo electrónico. Si todos los autores comparten la misma afiliación o si hay un solo autor no usar superíndices numéricos. Si hay un solo autor, no incluir la frase "Autor Principal / Corresponding Author"
- **Título en idioma alternativo:** Si su manuscrito es en Español, el título alternativo es la traducción en Inglés, y viceversa.
- **Abstract:** En Inglés, redactado como un párrafo continuo de máximo 400 palabras. Detalla brevemente los principales objetivos del estudio; explica cómo se realizó el estudio, incluyendo cualquier organismo modelo utilizado, pero sin entrar en detalles metodológicos; resume los resultados más importantes y su significado. No debe incluir citas bibliográficas ni abreviaciones y no debe estar separado en párrafos.
- **Keywords:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Inglés. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.
- **Resumen:** Es la traducción al Español del Abstract, y tiene sus mismas características.
- **Palabras clave:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Español. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.
- Se puede incluir un tercer resumen en Portugués, Francés, Italiano, Alemán u otra lengua, si lo considera necesario.

2. Desde la siguiente página se presentarán el texto organizado por encabezados, luego las tablas y las figuras del manuscrito. La organización dependerá del tipo de contribución. Se sugiere usar una organización según el método científico, por ejemplo:

#### Organización de un manuscrito sometido

##### como **Artículo**

Introducción  
Materiales y métodos  
Resultados  
Discusión  
Agradecimientos  
Referencias  
Contribuciones de los autores  
Tablas  
Figuras

#### Organización de un manuscrito sometido

##### como **Comunicación**

Texto (sin divisiones)  
Agradecimientos  
Referencias  
Contribuciones de los autores  
Tablas  
Figuras

**Otras secciones pueden ser:** revisión de literatura, conclusiones, recomendaciones. La estructura del artículo será revisado por y evaluado el/los editor(es) y los revisores.

3. En los **Agradecimientos** se incluye:

- Declaración explícita de las fuentes de financiamiento que permitieron el desarrollo del trabajo.
- Los detalles de los permisos o autorizaciones para el desarrollo de la investigación y las instituciones que los emitieron.
- Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan con los requisitos de autoría pueden ser mencionados en los Agradecimientos con una descripción de sus contribuciones.
- Los autores son responsables de asegurarse que toda persona nombrada en los agradecimientos está de acuerdo con eso.

4. La sección de **Contribuciones de los Autores** es necesaria cuando hay más de un autor. Se debe describir la contribución de cada uno de los autores para el desarrollo del artículo de manera explícita pero sucinta. La contribución puede ser:

- concepción de la investigación;
- diseño de la metodología;
- curación de datos para la investigación;
- administración del proyecto;
- adquisición, análisis o interpretación de los datos, incluyendo las labores de campo, laboratorio, experimentales, estadísticas, o el soporte técnico;
- adquisición de fondos;
- provisión de recursos, incl. equipos, materiales, reactivos, entre otros;
- desarrollo de software;
- supervisión o tutoría;
- validación y verificación de los resultados;
- redacción del manuscrito;
- revisión crítica del contenido intelectual del manuscrito;
- producción de tablas, figuras o material complementario.

**Ejemplo:**

María Álvarez y Pedro Pérez concibieron la investigación; Juan Norton y María Álvarez desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo de campo; Juan Norton, Jonathan Castro y Pedro Pérez diseñaron el modelo y corrieron los análisis; Jonathan Castro y María Álvarez realizaron los análisis moleculares; Pedro Pérez proveyó reactivos; Juan Norton y Jonathan Castro redactaron el manuscrito; Juan Norton, Jonathan Castro, Pedro Pérez, María Álvarez y Pedro Pérez revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito; Juan Norton tomó las fotografías de las figuras 1 y 3.

Recuerde que la autoría del manuscrito debe seguir los lineamientos de autoría de la ICMJE.

**5. Conflicto de interés**

El/los autor/es deben declarar la existencia de cualquier tipo de conflicto de interés en la publicación de la obra. Este apartado debe incluirse dentro del manuscrito antes de las referencias del mismo. La revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías sugiere una breve *Guía internacional sobre el Cdl*. Asimismo, la revista considera conflicto de interés (Cdl) cuando el autor o varios autores, durante los flujos de trabajo (redacción, revisión por pares, producción o publicación) mantienen vínculos con actividades o relaciones que puedan influir su juicio de forma inapropiada y así llevar a cabo conductas de investigación poco éticas que culminan con las malas prácticas académicas. Las situaciones más comunes en el ámbito del Cdl tienen que ver con relaciones financieras, parentescos, relaciones personales y rivalidad académica.

Al no declarar la Cdl, el manuscrito podrá ser rechazado por el comité editorial. Si un Cdl no revelado es publicado después del flujo editorial de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, el comité editorial tomará medidas de conformidad con la normativa del código de conducta del Committee on Publication Ethics y emitirá un comunicado público en el OJS.

**DIRECTRICES PARA REFERENCIAS**

- En el texto, usar citas numeradas colocadas al final de la oración entre corchetes. Los números de citas diferentes deben separarse por comas, a menos que sea un rango continuo de citas en cuyo caso se usará un guion. Ejemplos: [10] [10,15,22] [12-20].

- Numerar las citas secuencialmente según aparecen en el texto (NO en orden alfabético de las referencias).
- Citar los trabajos sin publicar, en preparación o en proceso de revisión como “(datos sin publicar)”; precedido por las iniciales y apellido del autor. Por ejemplo: A. Suárez (datos sin publicar)
- Se debe evitar las citas de información proveniente de correos electrónicos, cartas o documentos enviados entre colaboradores, pero si es absolutamente necesario, se deben referir como “com. pers.” cuando corresponden a comentarios sin respaldo de correspondencia, y como “in litt.” cuando hubo correspondencia escrita. En ambos casos, precedidos por las iniciales y apellido del colaborador y seguida del año. Por ejemplo: (J. Muñoz in litt. 2009) (J. Muñoz com. pers. 2010)
- Subtitular la lista de referencias como Referencias (no Bibliografía o Literatura Citada).
- Ordenar la lista de Referencias de acuerdo al orden secuencial que aparecen en el texto del manuscrito (NO en orden alfabético).
- El formato de las referencias debe seguir el estilo APA (6a Edición). Este estilo arma cada referencia con los siguientes componentes generales:
- Autores. (Año). Título de la obra. Datos de publicación.
- Ejemplos:

**Artículo en revista impresa:**

Andersson, L. G. (1945). Batrachians from East Ecuador, collected 1937, 1938 by Wm. Clarke-Macintyre and Rolf Blomberg. *Arkiv för Zoologi* (Stockholm), 37A(2), 1–88.

**Artículo en revista con URL:**

Ahlman, R. (2016). Green-winged Teal *Anas crecca carolinensis*, first record for Ecuador. *Cotinga*, 38, 40. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wpcontent/downloads/C38online/Ahlman.pdf>

**Artículo en revista con DOI:**

Jacobsen, D., Schultz, R., & Encalada, A. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology*, 38(2), 247–261. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x>

**Libro impreso:**

Diamond, J. (2006). *The Third Chimpanzee: The evolution and future of the human animal*. New York: Harper Perennial.

**Libro con URL:**

Suber, P. (2102). *Open Access. The MIT Press Essential Knowledge Series*. Cambridge: The MIT Press. Recuperado de <http://bit.ly/oa-book>

**Libro con editores con DOI:**

Walsh, S. J., & Mena, C. F. (Eds.). (2012). *Science and conservation in the Galapagos Islands: frameworks & perspectives*. Vol. 1. New York: Springer Science & Business Media. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5794-7>

**Capítulo de un libro impreso:**

Minogue, K. (2014). Does the idea of “self-interest” explain the character of modern free societies? En P. Lucio Paredes & S. Oleas (Eds.), *The Complexity of Liberty: Selected essays from the Mont Pelerin Society Special Meeting in Galápagos June 2013*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.

**Capítulo de un libro con DOI:**

Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega, H., Encalada, A. C., Carvajal-Vallejos, F. M., Rivadeneira, J. F., Acosta, F., Jacobsen, D., Crespo, A. & Rivera-Rondón, C. A. (2011). Biodiversity in aquatic systems of the Tropical Andes. En S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 276–294). Paris/São José dos Campos: Inter-American

Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). Recuperado de <http://www.iai.int/wp-content/uploads/2014/06/book.pdf>

#### Disertación:

Brandt, M. (2003). Influencia del erizo lapicero (*Eucidaris thouarsii*) en la estructura de la comunidad submarina de la cara norte del Islote Caamaño, Galápagos (Tesis de Licenciatura). Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito.

#### Enciclopedia en línea (cita global de toda la enciclopedia):

Frost, D. R. (2016). Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>

#### Ficha en enciclopedia en línea con URL:

Frost, D. R. (2016) *Nymphargus buenaventura* (Cisneros-Heredia and Yáñez-Muñoz, 2007). En Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <https://web.archive.org/web/20170206001235/http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/Amphibia/Anura/Centrolenidae/Centroleninae/Nymphargus/Nymphargus-buenaventura>

#### Noticia en periódico en línea:

En el limbo futuro de telescopio en Arecibo (2017, enero 30). *El Universo*. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20170206002227/http://www.eluniverso.com/vida-estilo/2017/01/30/nota/6023449/limbo-futuro-telescopio-arecibo>

- Separar cada autor con una coma, y colocar “&” antes del último autor. Las iniciales de los nombres de los autores van después de los apellidos. Indicar todos los autores y no usar et al.
- Incluir el número de la revista entre paréntesis luego del volumen, si está disponible.
- Separar el rango de páginas por un guion n (–). No confundir esto con un guion simple (-).
- Colocar el DOI (Digital Object Identifier) en todas las referencias que lo tengan disponible, precedido por “doi:”. El DOI debe estar en formato de enlace largo: <http://doi.org/xxx.xxx.xxx>
- No colocar un punto después del DOI .
- Si un DOI no está disponible (debe hacer una búsqueda exhaustiva), colocar un enlace estable hacia el sitio web de la revista (por ejemplo, el enlace estable de JSTOR) o un repositorio institucional (por ejemplo, *Archive.org*), con el texto “Recuperado de”. No colocar enlaces a páginas web personales, servicios no-permanentes de carga/descarga de archivos.
- Para incluir la dirección de Internet o URL de una página que podría cambiar en el futuro debe primero respaldar dicho URL en un archivo digital que resguarden dicha referencia para el futuro. Para esto puede usar Wayback Machine de Internet Archive <https://archive.org/web/> o el sistema *archive.is* <http://archive.is>. Esto debe ser hecho en particular para páginas que provienen de enciclopedias en línea, periódico de noticias, páginas personales o institucionales.
- Cuando se hace referencia a publicaciones en línea que tienen fechas específicas (como los blogs), se debe colocar (Año, Mes día) y no solo el año.
- Colocar Anónimo cuando no exista un autor determinado.
- Colocar n/f cuando no se conozca el año de publicación.
- Citar manuscritos aceptados para publicación como “in press” solamente si ya tiene la información de publicación del artículo (número de la revista y páginas). Artículos que no tengan esta información son considerados aceptados, pero no en prensa y serán citados como “datos en proceso de publicación” dentro del texto, pero no se incluirán en las Referencias Bibliográficas.



- No se aceptará literatura gris entre las referencias bibliográficas. La literatura gris corresponde a documentos que no están disponible por canales bibliográficos regulares (como bibliotecas o bases de datos en línea), y usualmente corresponde a reportes técnicos, informes y otros trabajos sin publicar. De ser en extremo necesario, su uso será autorizado por el Editor del manuscrito. Sin embargo, es preferible considerar la opción de colocar esa información como “datos sin publicar” o “comunicación personal”. De ser aprobada su inclusión como referencia, una copia del documento de literatura gris debe ser depositada en la Biblioteca de la USFQ.

### DIRECTRICES PARA TABLAS

- Citar tablas en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen. Ejemplos: “Tabla 1” “Tablas 1–3”
- Colocar las tablas luego del texto, cada una iniciará en su propia página.
- Las tablas deben alcanzar en una hoja A4 con márgenes de 2,5 cm, pudiendo esta orientarse de manera vertical y horizontal, según sea mejor para la apariencia de la tabla.
- Cada tabla debe tener su propia leyenda explicativa, la cual debe ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la tabla. Cada leyenda empezará con el número de la tabla. Ejemplo:

TABLA 1. Comparación de los efectos...

- Incluir unidades en los encabezados de columnas y filas entre paréntesis.
- De ser necesarias, colocar notas al pie de la tabla enlazadas con los siguientes símbolos en el mismo orden: \*, †, ‡, §, ¶. Sin embargo, es preferible colocar cualquier aspecto importante como parte de la leyenda.

### DIRECTRICES PARA FIGURAS

- Avances en Ciencias e Ingenierías publica sin costo figuras a color, siempre y cuando se relacionen directamente con el manuscrito.
- El término Figura hace referencia a todo tipo de imágenes, incluyendo gráficos, dibujos, fotografías y mapas.
- Citar figuras en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen usando la abreviatura “Fig”. Ejemplo: “Figs. 1–3”
- En el envío inicial, las figuras deben ir en baja resolución, siempre que sean legibles, e incluidas en el archivo de texto del manuscrito, luego de las tablas. Sin embargo, una vez aceptado el manuscrito, las figuras deben ser enviadas en resolución alta (mínimo 300 dpi, recomendable 600 dpi) en uno de los siguientes formatos: \*.tiff, \*.eps, \*.emf, \*.bmp, como documentos separados del archivo de texto.
- Cada figura irá en su propia página y precedida por su leyenda. La leyenda será autoexplicativa, debiendo ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la figura. Cada leyenda empezará con el número de la figura. Ejemplo:

FIGURA 1. Mapa de la región...

- Figuras dibujadas con líneas (line artwork) se preparan mejor en programas gráficos basados en vectores (e.g. Corel Draw, Illustrator, Freehand, Inkscape, ArcView). Por lo que es recomendable presentarlas en formato EPS. No use líneas de un ancho menor a 0.3 puntos.
- Las fotografías en blanco y negro, fotografías a color y mapas y gráficos realizados en programas basados en raster (e.g. Photoshop, Gimp) es recomendable que sean enviadas en formato \*.tiff. Para archivos \*.tiff, note que la resolución es irrelevante, es importante el tamaño en píxeles, por lo que recomendamos un tamaño mínimo de 1000 píxeles.
- Todo manuscrito que incluya un sitio de estudio debe incluir un mapa del mismo. Dicha figura debe: (1) ir rodeada de un borde con líneas delgadas, (2) estar geográficamente referenciado con algunas marcas de latitud y longitud y con un pequeño mapa insertado que indique la localización general, (3) tener una barra

de escala en km, (4) tener una flecha que indique el Norte (no usar una rosa de los vientos), y (5) tener líneas de referencia como límites de países, carreteras, ríos o elevaciones, extendiéndose hasta el borde.

- Para todas las figuras use líneas con un grosor entre 0.3-1.0 puntos y tamaños de letra de 12 puntos.
- Todas las letras y textos usados dentro de las figuras deben ir en Times.
- Si es que desea agregar varias imágenes como una sola figura compuesta o crear una lámina con varias imágenes que ocupe toda una página, no se preocupe por el diseño de la misma. En el primer envío del manuscrito no debe armar dicha figura, sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen. Cuando el manuscrito avance en el proceso de publicación, el equipo de diseño de la revista se ocupará de armar y diseñar sus imágenes compuestas o láminas.
- Recuerde que las figuras serán ajustadas al tamaño de una o dos columnas en una página A4, por lo que todos los elementos de la imagen deben ser lo suficientemente grandes para ser legibles después de la reducción de tamaño, en especial los textos internos y las líneas.
- Eliminar espacios blancos o vacíos innecesarios alrededor de las figuras.
- Incluir los créditos respectivos de la figura en la leyenda. Recuerde que es responsabilidad del autor tener los permisos necesarios para poder reproducir la figura bajo la Licencia Creative Commons de la revista.
- Si usa un mapa como una figura, debe citar la fuente del mapa. De ser posible, use mapas que sean de uso público o que permitan su uso irrestricto. Si usa Google Earth o Google Maps, debe seguir los lineamientos de atribución de Google.

### DIRECTRICES PARA MATERIAL SUPLEMENTARIO

- Los autores pueden publicar material suplementario junto a su manuscrito. Este material corresponde a información que complementa o provee soporte al manuscrito publicado y que se podrá descargar como archivos independientes.
- Diferentes tipos de información pueden ser incluidos como material suplementario: textos extensos sobre metodologías, bases de datos, archivos de vídeo, de audio, fotográficos y otros respaldos audiovisuales, entre otros.
- Los Materiales Suplementarios reemplazan a los Apéndices.
- Estos materiales serán citados al final del manuscrito con enlaces al portal de la revista donde estarán a disposición del público de manera gratuita.
- Si el material suplementario está compuesto por texto, debe ser presentado con el mismo formato general requerido para el manuscrito.
- De ser necesario, citar archivos de Material Suplementario en el texto siguiente el siguiente formato: Fig. S1, Tabla S1, Datos S1, Vídeos S1, Artículo S1, Audio S1. Donde la S indica que es material suplementario, y el número indica la secuencia numérica de dicho material.
- Para maximizar compatibilidad, sugerimos que envíe su Material Suplementario en los siguientes formatos: Imágenes en JPG, EPS o PNG; tablas en XLS o XLSX; textos en PDF; vídeos en AVI, MOV o MP4, y archivos de audio en WAV o MP3.
- Sets grandes de datos suplementarios se pueden presentar en formato comprimido (zip o tar).

### DIRECTRICES SOBRE NOMENCLATURA BIOLÓGICA Y DESCRIPCIÓN DE NUEVAS ESPECIES

- ACI Avances en Ciencias e Ingenierías cumple con los requisitos establecidos por los diferentes códigos de nomenclatura sobre la validez para la descripción de nuevas especies y la disponibilidad de los artículos en

línea como trabajos publicados, incluyendo el International Code of Zoological Nomenclature y el International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants.

- La revista se encargará de obtener los registros y el GUID (LSID) en Zoobank, IPNI y Mycobanl o Index Fungorum.
- Todos los artículos y comunicaciones de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías están siendo depositados en Internet Archive [Archive.org](http://Archive.org) y en el repositorio USFQ.
- Los autores deben adherirse a los lineamientos establecidos por los códigos internacionales de nomenclatura respectiva al organismo tratado.
- Las descripciones de especies nuevas de seres vivos o los análisis taxonómicos deben seguir lo establecido en el respectivo código de nomenclatura.
- Cuando un taxón biológico es mencionado por primera vez, se debe escribir su nombre común (como nombre propio) seguido por su nombre científico en cursiva, por ejemplo: Oso de Anteojos *Tremarctos ornatus*. No colocar el nombre científico o el nombre común entre paréntesis. Más adelante en el manuscrito se puede usar solamente el nombre científico o el nombre común.
- Si el manuscrito corresponde a un análisis taxonómico o si existe controversia en relación a la nomenclatura del organismo estudiado, presentar el nombre del taxón seguido por los datos de autoría taxonómica al mencionarlo por primera. Los datos de autoría taxonómica de nombres zoológicos son los apellidos de los descriptores y el año de descripción, separados por una coma, ejemplo: *Grallaria ridgelyi* Krabbe et al., 1999. La autoría taxonómica de nombres botánicos debe seguir lo especificado en The International Plant Names Index. Colocar la autoría taxonómica entre paréntesis solo si existió un cambio a nivel del género. Cuando hay tres o más descriptores utilizar "et al." sin cursivas.

### ENVÍO DEL MANUSCRITO

1. Todos los manuscritos sometidos a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben ser enviados a través del portal en línea. En la sección Envíos en Línea podrán registrarse y crear un Nuevo Envío.
2. Si manuscrito tiene más de un autor, por favor incluya la información de todos los autores en el sistema (incluyendo sus correos electrónicos).
3. Al momento de someter su manuscrito, debe indicar el nombre, institución y correo electrónico de por lo menos cuatro posibles revisores que podrían hacer la evaluación de pares académicos de su manuscrito. Estas personas deben ser capaces de proveer una evaluación objetiva de su manuscrito, por lo que no pueden pertenecer a la institución de ninguno de los autores, ni estar involucrados en el estudio de manera directa o indirecta. El equipo editorial de la revista se reserva el derecho de seleccionar a los revisores sugeridos al momento del envío del manuscrito o de buscar a otros revisores.
4. Para el envío inicial, el manuscrito debe consistir de un solo archivo que incluya: el texto, las tablas y figuras. Las tablas y las figuras deben ir luego del texto (no intercaladas en el texto). Cada tabla y figura irá en su propia página y estará precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, deberá ser enviado como archivos separados y subidos al momento del envío inicial.
5. Si es que algunas de las figuras de su manuscrito es una figura compuesta por varias imágenes, no debe armar dicha figura sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. 5A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
6. La revista mantendrá comunicación directa con el autor para correspondencia, quien es el responsable de someter el manuscrito, recibir las revisiones, enviar el manuscrito revisado, aprobar la corrección de originales y las pruebas de imprenta.

## LISTA DE COMPROBACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE ENVÍOS

Como parte del proceso de envío, los autores/as están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores/as aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

- El estudio presenta los resultados de investigación científica primaria.
- El envío no ha sido publicado previamente ni se ha sometido a consideración en otra publicación.
 

**NOTA:** ACI Avances en Ciencias e Ingenierías apoya a los autores que desean compartir su trabajo de manera temprana a través de archivos/repositorios de prepublicaciones (preprint servers/repositorios), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, Zenodo, entre otros. De igual forma consideramos manuscritos que han salido únicamente como tesis en repositorios institucionales o trabajos que han sido presentados en actas de conferencias.
- Todas las metodologías de análisis, tanto experimentales, estadísticas y otras, se han realizado bajo estándares técnicos de alta calidad y se describen en suficiente detalle para garantizar su reproducibilidad.
- Todas las conclusiones se pasan en la interpretación justificada y apropiada de los resultados. Los autores deben evitar exagerar el alcance de sus conclusiones y si bien pueden discutir el posible impacto de sus resultados deben identificar sus ideas como hipótesis y no como conclusiones.
- Los textos están escritos de una manera entendible y clara, teniendo un correcto uso del lenguaje. Los manuscritos aceptados por la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías pasan por una corrección del lenguaje y estilo, sin embargo errores en el uso del lenguaje pueden nublar el correcto entendimiento del contenido y provocar evaluaciones negativas por parte los revisores.
- El estudio debe cumplir con todos los estándares aplicables de ética en la experimentación e integridad científica. Todos los estudios relacionados con seres vivos, líneas celulares, muestreo de campo o que tengan potenciales implicaciones de bioseguridad deben contar con las aprobaciones de un comité de ética institucional / IRB, así como con todos los permisos legales requeridos por el país donde se realiza la investigación.
- El manuscrito sigue estándares utilizados por la comunidad de su disciplina científica y garantiza la disponibilidad de los datos. La disponibilidad de los datos se puede realizar colocándolos como material suplementario del manuscrito o depositándolos en repositorios digitales confiables.
- Todos los autores han participado en el desarrollo del manuscrito, lo han leído y están de acuerdo con su envío a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, y de ser aceptado, están de acuerdo que sea publicado según a la *Política de Acceso Abierto de la revista*.
- Todos los autores cumplen con los requisitos de autoría detallados en la *Política de Autoría*.
- El envío inicial del manuscrito consiste de un solo archivo, que incluye: el texto, las tablas y figuras en el mismo archivo. Las tablas y las figuras van luego del texto (no intercalarlas con el texto). Cada tabla y figura está en su propia página y está precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, se lo envía como archivos separados.
- Si es que hay figuras compuesta por varias imágenes, se colocó la leyenda de la figura y luego se pegó cada imagen separada. Cada imagen tiene su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
- Siempre que sea posible, se proporcionan DOI o direcciones URL estables para las referencias.

## AVISO DE DERECHOS DE AUTOR/A

**Los autores que publiquen en la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías aceptan los siguientes términos:**

- La revista está considerada como una publicación de acceso abierto (*open access*) regida bajo los parámetros de la Licencia de reconocimiento de Creative Commons.

- Los autores conservarán sus derechos de autor y garantizarán a la revista el derecho de primera publicación de su obra, la cual estará simultáneamente sujeta a la [Licencia de reconocimiento de Creative Commons](#) que permite a terceros compartir la obra siempre que se indique su autor y su primera publicación esta revista.
- Los autores podrán adoptar otros acuerdos de licencia no exclusiva de distribución de la versión de la obra publicada, pudiendo de esa forma publicarla en un volumen monográfico o reproducirla de otras formas, siempre que se indique la publicación inicial en esta revista.
- Se permite y se recomienda a los autores difundir su obra a través de Internet:
- Antes del envío a la revista, los autores pueden depositar el manuscrito en archivos/repositorios de pre-publicaciones (preprint servers/repositories), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, entre otros, lo cual puede producir intercambios interesantes y aumentar las citas de la obra publicada (Véase [El efecto del acceso abierto](#)).
- Después del envío, se recomienda que los autores depositen su artículo en su repositorio institucional, página web personal, o red social científica (como Zenodo, ResearchGate o Academia.edu).

### **DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD**

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

**aci**  
avances  
en ciencias e  
ingenierías



**USFQ**  
**PRESS**