

ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 13 • N°2 • Abril 2022

Sumario

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA PARA PREDECIR LA RESPUESTA DE AEROGENERADORES SIN PALAS A VIBRACIONES INDUCIDAS POR EL VIENTO EN CIUDADES COMPACTAS (Numerical simulation of fluid-structure interaction to predict the response of bladeless wind turbines to wind-induced vibrations in compact cities) <i>Cristian Andrade-Terán</i>	1
RETENCIÓN DE VITAMINA C EN EL PROCESAMIENTO DE LA PULPA DE COPOAZÚ (<i>THEOBROMA GRANDIFLORUM</i>) ENLATADA (Retention of vitamin C in the processing of canned cupuassu pulp (<i>Theobroma grandiflorum</i>)) <i>Robert Tecse-Tecsi, Virne Mego-Mego, Miguel Chávez-Pinchi, Lastenia Cutipa-Chávez, Luis Vargas-Vásquez</i>	17
REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE LOGÍSTICA INVERSA, SUS APLICACIONES Y TENDENCIAS FUTURAS (Literature Review of Reverse Logistic, applications and future trends) <i>Jorge Campoverde, Martha Elena Carrillo, Jonnathan Jiménez Yumbla, Raúl Roldán Nariño, Diego Loyola y Katherine Coronel-Pangol</i>	31
MODELACIÓN Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE FLUIDO DEL <i>PIPTOCOMA DISCOLOR</i> (PIGÜE) PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN EN EL ECUADOR (Modeling and computational simulation of <i>Piptocoma discolor</i> (Pigüe) fluid for combustion optimization in Ecuador) <i>Juan Elías González, Deny Oliva M., David Zambrano Vera, Rubén Darío Ledesma, Mario Jorge Bonilla, Erika Clara Casco G., Édison Ernesto Zúñiga</i>	48
CARACTERIZACIÓN DE AGENTES DE CONSUMO ENERGÉTICO EN EL SECTOR RESIDENCIAL DEL ECUADOR BASADA EN UNA ENCUESTA NACIONAL Y EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA MODELAMIENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS (Characterization of energy consumption agents in the residential sector of Ecuador based on a national survey and geographic information systems for modelling energy systems) <i>Diego Moya, Dennis Copara, Jorge Amores, Manolo Muñoz, Ángel Pérez-Navarro</i>	68
INSECTICIDAL POTENTIAL OF SOME INDIGENOUS WEEDS EXTRACTS OF BAHAWALPUR PAKISTAN AGAINSTDUSKY COTTON BUG (<i>OXYCARENUS HYALINIPENNIS</i>) (COSTA) (HEMIPTERA: LYGAIDAE) UNDER LABORATORY CONDITIONS (Potencial insecticida de algunos extractos de malas hierbas autóctonas de Bahawalpur Pakistán contra el chinche del algodón [<i>Oxycarenum hyalinipennis</i>] [Costa] [Hemiptera: Lygaidae] en condiciones de laboratorio) <i>Noor ul Huda Fatima, Muhammad Waqar Hassan, Muhammad Iqbal, Moazzam Jamil, Javaid Iqbal</i>	98

Simulación numérica de la interacción fluido-estructura para predecir la respuesta de aerogeneradores sin palas a vibraciones inducidas por el viento en ciudades compactas

(Numerical simulation of fluid-structure interaction to predict the response of bladeless wind turbines to wind-induced vibrations in compact cities)

Cristian Andrade-Terán¹

Resumen

En este artículo se presenta un análisis de la respuesta fluido-estructura de los aerogeneradores sin palas que funcionan por resonancia aeroelástica inducida, los cuales pueden ser utilizados en ciudades o pueblos pequeños para formar parte de un urbanismo sostenible. En este análisis se llevan a cabo simulaciones numéricas del comportamiento del viento y del efecto denominado vórtices de von Karman que produce al rodear la estructura del aerogenerador utilizando como datos de entrada las velocidades del viento medidas por la Estación Meteorológica Mariscal Sucre en Quito. Las simulaciones CFD determinan la señal de excitación causada por los diferentes flujos de viento existentes. Asimismo, los efectos que estas oscilaciones causan en la estructura se simulan a través de un estudio modal y respuesta armónica a resonancia. Los resultados obtenidos muestran un aumento proporcional en la frecuencia y amplitud del desprendimiento de vórtices al aumento de la velocidad del viento, lo que provoca diferentes señales de excitación que hacen que el aerogenerador oscile con amplitudes entre 6 a 11 cm. Finalmente, las simulaciones transitorias muestran que la presencia de casas y edificios en las cercanías en donde se instala el aerogenerador hacen que la dirección de la calle de vórtices varíe, así como las alteraciones en la frecuencia y amplitud de la excitación.

Palabras clave

Respuesta armónica, resonancia, sostenible, turbina eólica, vibración inducida.

Abstract

This article presents an analysis of the Fluid-Structure response of bladeless wind turbines that work by induced aeroelastic resonance, which can be used in cities or small towns to form part of sustainable urban planning. In it, numerical simulations of the behavior of the wind and the effect called Von Karman Vortices that it produces when surrounding the structure of the wind turbine are carried out, taking as input data the wind speeds measured by the Mariscal Sucre Meteorological Station in Quito. CFD simulations determine the excitation signal caused by the different existing wind flows, the effects that these oscillations cause on the structure are simulated through a modal study and harmonic response to resonance. The results obtained show a proportional increase in the frequency and amplitude of the vortex shedding to the increase in wind speed, causing different excitation signals that cause the wind turbine to oscillate with amplitudes between 6 and 11 cm. Finally, the transient simulations show that the presence of houses and buildings in the vicinity where the wind turbine is installed causes the direction of the vortex street to vary, as well as alterations in the frequency and amplitude of the excitation.

Keywords

Wind turbine without blades, induced vibration, harmonic response, resonance, sustainable.

Introducción

Una turbina eólica es un sistema que utiliza la turbulencia del viento para generar energía eléctrica. Convencionalmente, se han utilizado grandes estructuras con palas para absorber la energía eólica; sin embargo, hoy existen modelos de aerogeneradores sin palas, más pequeños y simples de instalar, que aprovechan el efecto de desprendimiento de vórtices generado por la dinámica del viento al evadir la estructura del aerogenerador. Por ejemplo, la empresa española Vortex Bladeless presentó una patente con varios modelos de turbinas eólicas que aprovechan exitosamente la energía eólica mediante la generación de vórtices inducidos a pequeña y mediana escala. (Yáñez, 2018).

En dinámica de fluidos, la generación de vórtices es un fenómeno bien estudiado. Esta ocurre cuando un flujo, ya sea laminar o turbulento, cruza un obstáculo. El desprendimiento de vórtices, también denominados vórtices de von Karman, induce o causa vibraciones en el eje transversal a la dirección del flujo. Estas fluctuaciones que dependen de la velocidad del fluido alcanzan una frecuencia estable que, al entrar en resonancia con la frecuencia natural de la estructura, hace que la estructura vibre durante mucho tiempo. En las construcciones civiles se intenta evitar a toda costa este efecto para prevenir fracturas o, al menos, que la estructura esté adaptada para soportar elásticamente las vibraciones. El viento es la carga estocástica que genera las calles de vórtices al cruzar estructuras. (Lopez, 2002; Saengsaen et al., 2019). En la actualidad se ha avanzado notablemente en modelos no lineales y en el estudio de las vibraciones en estructuras civiles. Dentro de este campo se encuentran los análisis modales en los que se emplean simulaciones numéricas para determinar la frecuencia natural que puede tener una determinada estructura, así como la respuesta a un estímulo externo que en superposición genera deformaciones o vibraciones, fenómeno conocido como resonancia (Karaağaçlı & Özgüven, 2021; Peter & Leine, 2017).

La energía que crea el viento por el desprendimiento de vórtices en la estructura es utilizada por el aerogenerador sin palas, mediante la transformación de la energía mecánica inducida por vibración, para obtener energía eléctrica a través de un alternador de imanes fijos. Las ventajas de este tipo de aerogenerador con respecto a los aerogeneradores con palas son principalmente su fácil instalación y mantenimiento, porque no está constituido por mecanismos complejos, sino que ocupa únicamente un mecanismo de imanes permanentes para la amortiguación del armónico inducido, lo que evita recurrir a sistemas de amortiguación más complicados y que requerirán un mayor mantenimiento (Yáñez, 2018, enero 23). Otra ventaja aparente es la distribución y composición de un conjunto de aerogeneradores, ya que en diferentes estudios se ha constatado que no influye de forma drástica colocarlos relativamente cerca, por lo tanto, se puede colocar varios de ellos para trabajar en conjunto (Saengsaen et al., 2019). A diferencia de los generadores convencionales, estos generan poca energía y están diseñados para ser utilizados cerca de donde se consumirá la energía, por lo que se instalan en áreas urbanas y en ciudades pequeñas.

Actualmente, los principios de sostenibilidad y los objetivos de desarrollo sostenible son fundamentales en cualquier tipo de proyecto, planificación y tecnología. Uno de estos objetivos está orientado a garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, y otro objetivo fundamental es adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Es decir, cualquier acción, por pequeña que sea, es de gran ayuda para

lograr estos objetivos. Los aerogeneradores de vibración inducida son generadores de electricidad compactos y fáciles de instalar (diseñados para entornos urbanos) que junto con los paneles solares microhidroeléctricos pueden contribuir a la estrategia para formar ciudades sostenibles, con la cual se pretende urbanizar de manera compacta, mantener espacios verdes, reducir emisiones y utilizar fuentes de eficiencia energética y energía renovable para desarrollar ciudades compactas e inteligentes. (Andrade, 2021, julio 27; Comisión de Sustentabilidad Capbauno, 2020).

Material y métodos

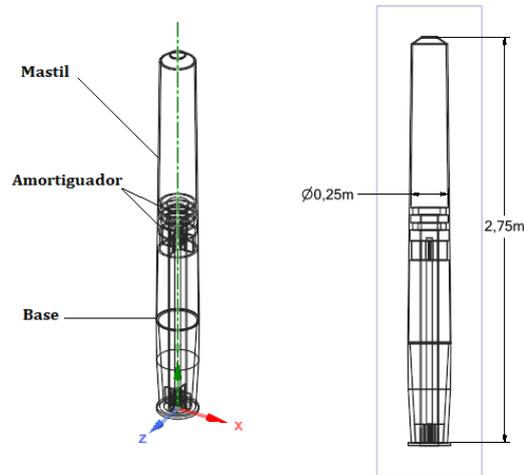
Para entender y predecir el funcionamiento de un generador sin palas, que funciona aprovechando la energía que provoca el viento al producir vórtices en una estructura vertical, se ha estudiado el fenómeno tanto en la dinámica del fluido como en la respuesta de la estructura. Para realizar un análisis completo de la interacción fluido-estructura mediante simulación numérica, se ha llevado a cabo una modelación y simulación de las propiedades mecánicas y estructurales del aerogenerador, para determinar los modos naturales de vibración y el sistema de amortiguación necesarios para los diferentes flujos de viento. Asimismo, las simulaciones CFD ha servido para analizar los efectos del fluido (aire) sobre la estructura en condiciones ambientales medidas en una determinada zona de Sudamérica midiendo la frecuencia de desprendimiento de vórtice causado por el viento a su paso por un aerogenerador instalado. También se ha analizado la influencia del entorno donde se instalará para predecir su funcionamiento en ese entorno.

2.1 Definición de la estructura

Basada en el modelo propuesto por Vortex Bladeless (España Patente n.º BR112013002403A, 2018) de 2.75 m de altura y 25-30 cm de diámetro, con velocidad de arranque de 3 m/s y potencia nominal estimada de 100 W en condiciones óptimas, la estructura de la turbina eólica se modela digitalmente y su rigidez se ajusta para adaptarse a las condiciones de la región. En la figura 1 se ilustra el aerogenerador sin palas para el cual se harán los estudios. Se ha diseñado un modelo 3D para determinar aspectos de su composición y geometría a través de un análisis mecánico estructural y modal. La estructura está compuesta por una parte móvil de oscilación y dos fijas de amortiguación-sujeción. El mástil o parte móvil está diseñado a base de fibra de carbono de peso medio, y las zonas de sujeción de acero estructural, con un anclaje al suelo, el cual aumenta la rigidez de toda la estructura.

Mediante un análisis modal de elementos finitos con Ansys Mechanical APDL, se ha calculado, utilizando la geometría descrita en la figura 1 y las condiciones de borde al ser instalado, los modos de vibración natural de la estructura libremente sin aplicar ningún tipo de mecanismo o sistema externo de amortiguación. En la tabla 1 se presentan las frecuencias de vibración natural de la estructura en diez modos diferentes.

Figura 1. Diagrama del aerogenerador de estudio basado en el modelo Tacoma



A partir de este estudio modal se ha podido estudiar la rigidez necesaria de la estructura, las condiciones mecánicas y los esfuerzos realizados en los diferentes modos. Posteriormente, se ha analizado la respuesta de la estructura a la resonancia provocada por la perturbación del viento al bordear el aerogenerador, introduciendo como entrada la frecuencia y la fuerza de sustentación que los vórtices desprenden en la estela posterior a la estructura. La ecuación fundamental utilizada para el estudio modal de la estructura libre de carga es Ec.1:

$$[M]\{\ddot{u}\} + C\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

Donde:

$[M]$: matriz de masas

$\{\ddot{u}\}$: vector de aceleraciones

C : amortiguamiento del sistema

$\{\dot{u}\}$ vector de velocidades

$[K]$: matriz de rigidez

u : desplazamientos

Tabla 1. Modos de vibración natural de la estructura de la turbina eólica sin sistema de amortiguación

Modo	Frecuencia (Hz)
1	1.177
2	1.1865
3	9.5002
4	9.5764
5	10.085
6	99.831
7	101.
8	135.96
9	190.86
10	235.16

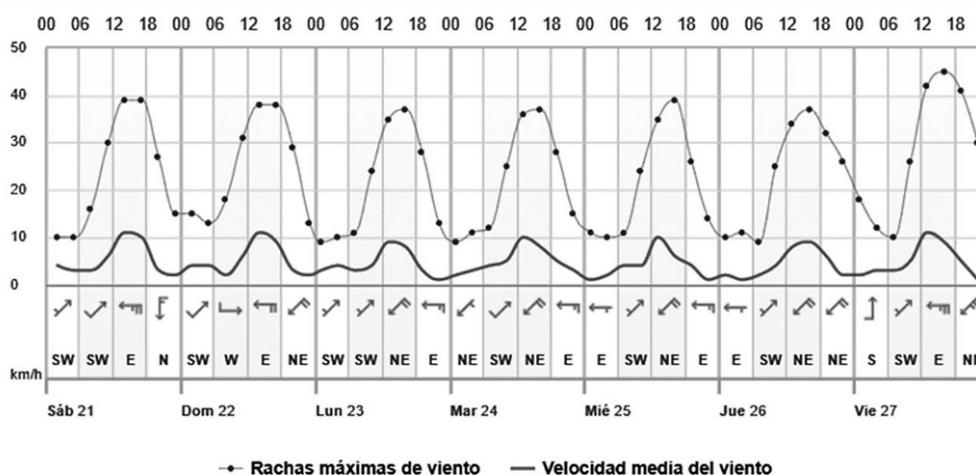
De la tabla 1, solo los modos 1 y 2 tienen vibraciones transversales con las que se puede trabajar para convertir el movimiento en energía eléctrica. Al variar la masa y la rigidez de la estructura, la frecuencia natural de oscilación se puede ajustar para aproximarse a la frecuencia de excitación generada por el desprendimiento de vórtices en la superficie cilíndrica de la turbina eólica. Los sistemas de amortiguación mecánica como resortes o imanes permanentes se han utilizado previamente para amortiguar o ajustar la frecuencia. En este trabajo se presentan las fuerzas necesarias por unidad de volumen en los soportes de amortiguación necesarios para ajustar la rigidez de la estructura con el fin de lograr resonancia con la excitación, y se valida con un estudio de respuesta asumiendo una excitación completamente armónica (Yáñez, 2018, junio 7; Y. Hu et al., 2018).

Los análisis de armónicos son utilizados para determinar la respuesta en estado estable de una estructura a cargas que varían sinusoidal o armónicamente con el tiempo, con lo que se puede predecir como esta estructura se comportará al entrar en resonancia (Ansys, 2020). Como se verá posteriormente la excitación provocada por el desprendimiento de vórtices ocurre de forma muy similar a un armónico por lo que se ha parametrizado esta señal como armónicos a diferentes frecuencias y amplitudes, dependiendo de la velocidad del flujo de viento, para simular sus efectos sobre el mástil del generador. Esta señal en superposición, cuando es igual a la frecuencia natural genera la resonancia que actuará sobre la estructura del aerogenerador haciéndola vibrar.

2.2 Definición de fluidos

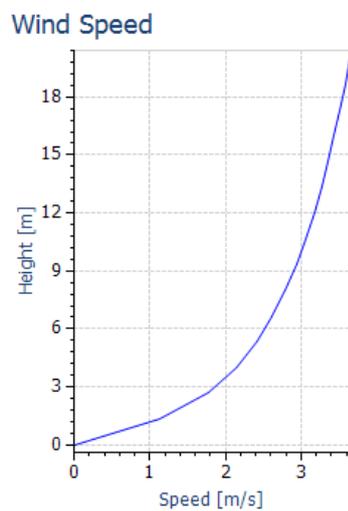
Para caracterizar el flujo de viento que actúa en la región, se han utilizado los datos medidos durante 7 días por el centro de la estación meteorológica ubicada en el parque Bicentenario (antiguo Aeropuerto Mariscal Sucre), ubicado geográficamente en la latitud -0.225219 , longitud: -78.5248 $0^{\circ} 13' 31''$ sur, $78^{\circ} 31' 29''$ oeste, en la zona ecuatorial del planeta. En la figura 2 se presenta la tabla proporcionada por Meteored (2021), para un periodo de 7 días en Quito, Ecuador, estación Mariscal Sucre. Las mediciones realizadas en los últimos días de agosto, en los cuales se registraron mayores velocidades de ráfagas en el viento, e históricamente es el periodo del año en el que existen mejores condiciones para aerogeneradores. Estas lecturas se hicieron a 10 m de la superficie terrestre, con una presión promedio de 540 mmHg y humedad del aire de entre 70 y 76 %.

Figura 2. Velocidad media, dirección y ráfagas de viento



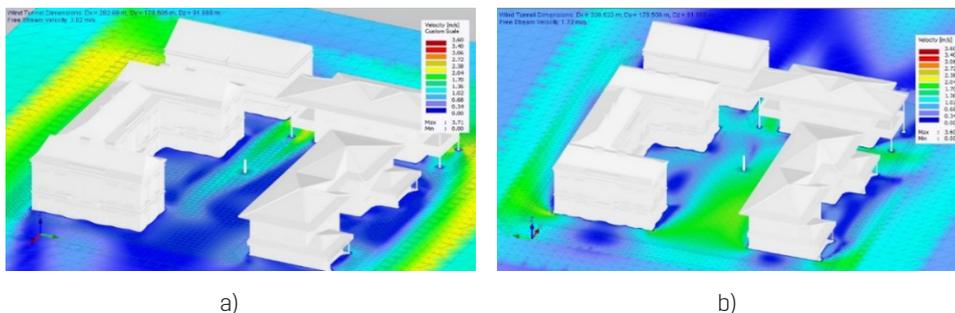
Los métodos de simulación de la dinámica de fluidos en régimen estacionario permiten establecer y predecir intensidades y dirección del viento actuante sobre el cañón o zona urbana, así como las turbulencias que causarán las obstrucciones de flujo causadas por edificaciones en las ciudades (Bustamante Campoverde, 2021). Utilizando Rwind, un *software* especializado para simular los efectos del viento sobre estructuras, que a su vez utiliza un solucionador OpenFoam, se han podido predecir los efectos de la interacción del fluido con un entorno urbano modelado con varias casas y pequeños edificios donde se pretende instalar aerogeneradores sin palas. El túnel de viento se ha definido con la magnitud de caudal medio más frecuente entre las 12 de la mañana y las 6 de la tarde en los 7 días consultados, aproximadamente 10 km/h (2,77 m/s), y se asume un perfil de viento para ciudades pequeñas con pocos edificios (Guevara Díaz, 2013). El perfil de viento está ilustrado en la figura 3.

Figura 3. Perfil eólico utilizado para el análisis en áreas urbanas



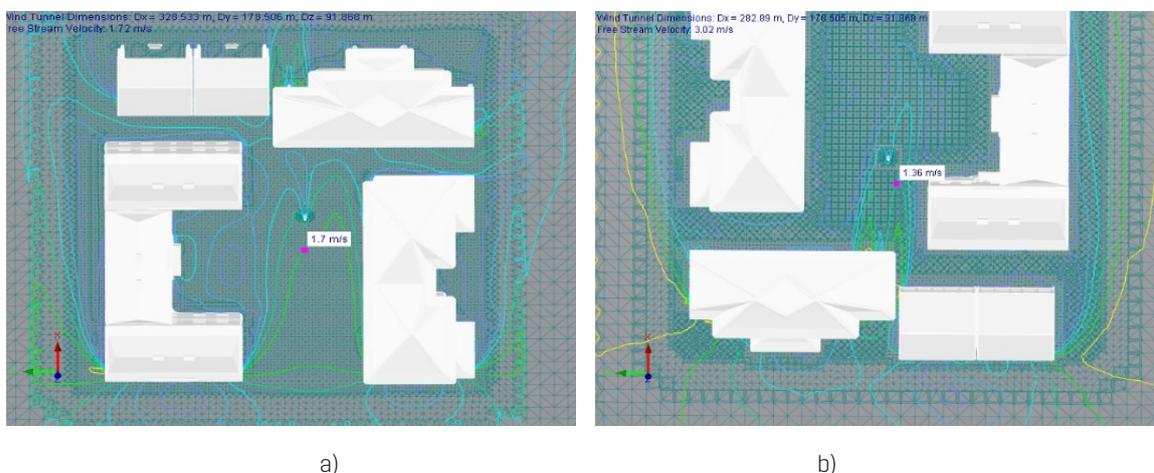
Tanto en la figura 4 como en la 5 se presentan contornos de velocidad del viento en la dirección delantera (0°) y la dirección trasera (180°). En estas pruebas se observaron notables variaciones en la magnitud y dirección del viento producidas por impactos en las superficies de edificios, lo cual genera turbulencias, a diferencia del flujo en campos abiertos. Por ello, se han analizado estos detalles con la simulación transitoria del fluido sobre la estructura.

Figura 4. Contornos de la velocidad en entorno urbano



Nota: a) dirección 0° , b) dirección 180° .

Figura 5. Isolíneas de flujo de viento en entorno urbano



Nota: a) dirección 0°, b) dirección 180°.

Para simular los efectos transitorios del viento en una sección del aerogenerador, se ha utilizado un entorno bidimensional con Ansys Fluent implementando un modelo de simulación de foucault desprendido (DES) que se ha adaptado al modelo Spalart-Allmaras (S-A) de una sola ecuación basada en la vorticidad, para predecir los efectos de la turbulencia a lo largo del tiempo. La función de transporte para el modelo se describe en la Ec.2. Se ha utilizado un método de solución SIMPLE y una formulación transitoria implícita de segundo orden estableciendo un tiempo entre pasos del orden 10^{-3} (Spalart & Allmaras, 1992) en un lapso de 10 s para la velocidad media del viento y de 5 s para ráfagas de viento, donde se monitorean parámetros aerodinámicos como el coeficiente de arrastre y el coeficiente de elevación (Cl) y se traza la fuerza de elevación, de modo que se pueda establecer la frecuencia con la que se liberan los vórtices desde la superficie de la turbina eólica. Se ha utilizado el modelo DES o simulación de remolino dependiente con modificación S-A, ya que en trabajos previos con simulación 2D de generación de vórtices se ha mostrado una mejor predicción de la frecuencia de desprendimiento (Saengsaen et al., 2019; Y. Hu et al., 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_{\tilde{\nu}} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} \quad (2)$$

Donde:

$G_{\tilde{\nu}}$: es la producción de viscosidad turbulenta

$Y_{\tilde{\nu}}$: es la destrucción de la viscosidad turbulenta que se produce a la menta a la pared

$\sigma_{\tilde{\nu}}, C_{b2}$: son constantes (0.66; 0.62)

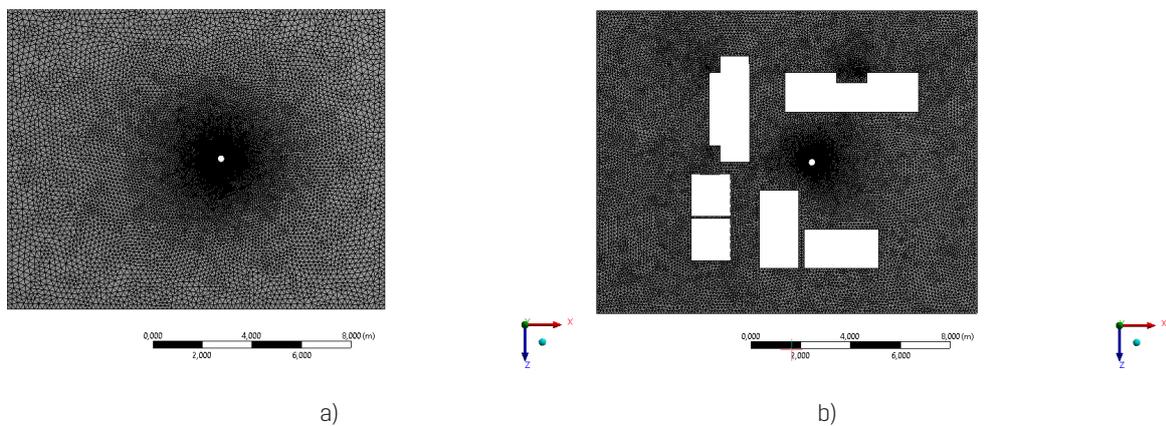
ν : viscosidad cinemática

$S_{\tilde{\nu}}$: término determinista

El flujo de viento se ha simulado tomando los valores presentados en la figura 2, para la velocidad media y las ráfagas alcanzadas en las horas punta. Además, se ha analizado las variaciones que se producen a causa de la interacción del viento en un entorno urbano obsta-

culizado por edificaciones, como casas y edificios pequeños, así como un entorno de campo abierto sin obstáculos para fluir. Se asume que el aerogenerador está instalado de tal manera que interactúe con el flujo medido a 10 m por Meteored (2021) y se ha simulado para un valor medio del diámetro de la estructura de 0.275 m. El mallado de campo 2D utilizado en las simulaciones transitorias CFD se muestra en la figura 6 para flujo libre y flujo obstaculizado respectivamente. Así se han definido dos ambientes diferentes con condiciones de contorno iguales para comparar el comportamiento del viento y la estela de vórtices que deja a su paso al rodear la estructura del aerogenerador.

Figura 6. Geometría de control 2D mallada para simulación transitoria de desprendimientos de vórtices



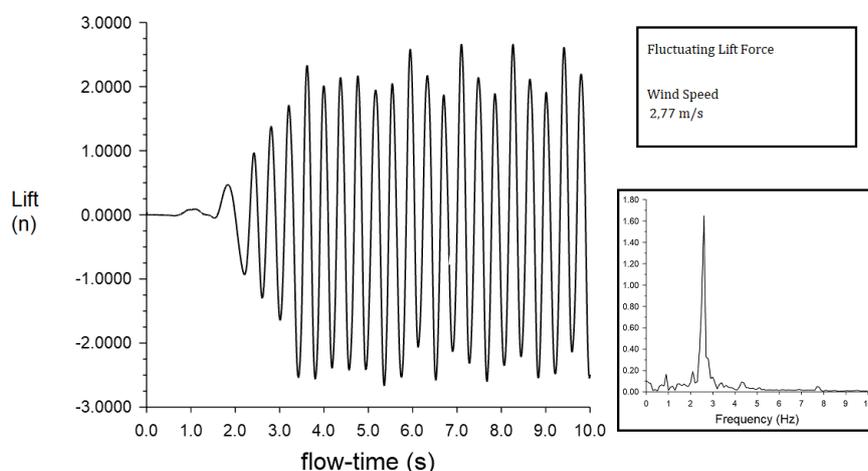
Nota: a) campo abierto b) en entorno urbano

Resultados y discusión

3.1 Respuesta estructural al estímulo del viento que fluye libremente

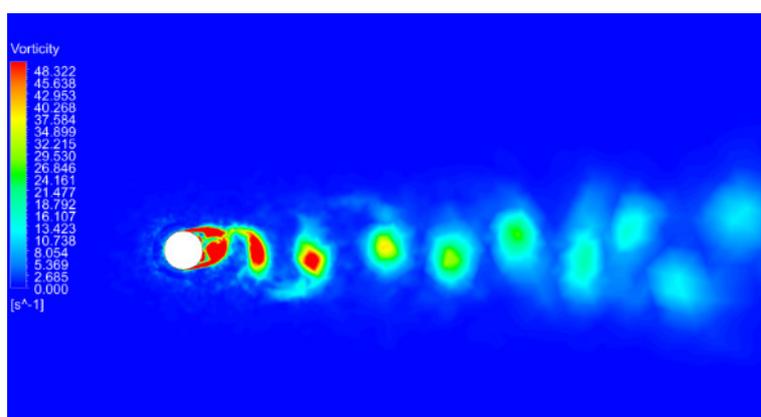
Inicialmente se ha necesitado definir la señal de excitación provocada por el fluido, que en este caso es el viento, la cual causará la vibración en la estructura. Con base en las velocidades del viento descritas en los datos obtenidos en los 7 días consecutivos de agosto, las magnitudes de entrada han sido parametrizadas como condición de borde en la simulación CFD de túnel de viento transitorio. Primero, sin modelar ningún obstáculo al flujo del viento, se obtiene la curva de oscilación de fuerzas a través del tiempo sobre el eje transversal a la dirección de ataque del viento, y, mediante la transformada de Fourier, se convierte esta señal al dominio de la frecuencia para determinar las propiedades con la que el viento excitará a la estructura. A continuación, en la figura 7 se muestra la curva de oscilación de la fuerza de elevación que se crea y su respectiva transformada de Fourier para la velocidad media más frecuente, señal que se extiende similarmente a lo largo de todo el mástil.

Figura 7. Fuerzas de soporte de la curva de oscilación y diagrama espectral para la velocidad media del viento



Con los datos obtenidos de la simulación, es posible determinar la frecuencia con la que los vórtices se desprenden en la estela dejada por el aire al rodear la estructura del aerogenerador y la dirección en que aparece la calle de vórtices. Para la velocidad media del viento con magnitud de 2.77 m/s, la frecuencia de desprendimiento es de 2.625 Hz. Determinada la velocidad regular del viento en la zona donde se recogieron los datos en 7 días, se busca que esta sea la velocidad de entrada con la que funcione el aerogenerador sin palas. En la figura 8 se ilustra el desprendimiento de vórtices que se produce para un flujo de viento de 2.77 m/s y $Re = 5.2E4$ alrededor de la superficie circular que representa al perímetro del aerogenerador; se puede ver la dirección constante en la que se desprenden los vórtices y como al alejarse de la estructura se desvanecen. No existir ningún obstáculo alrededor, no hay cambios de dirección ni cambios bruscos en magnitud.

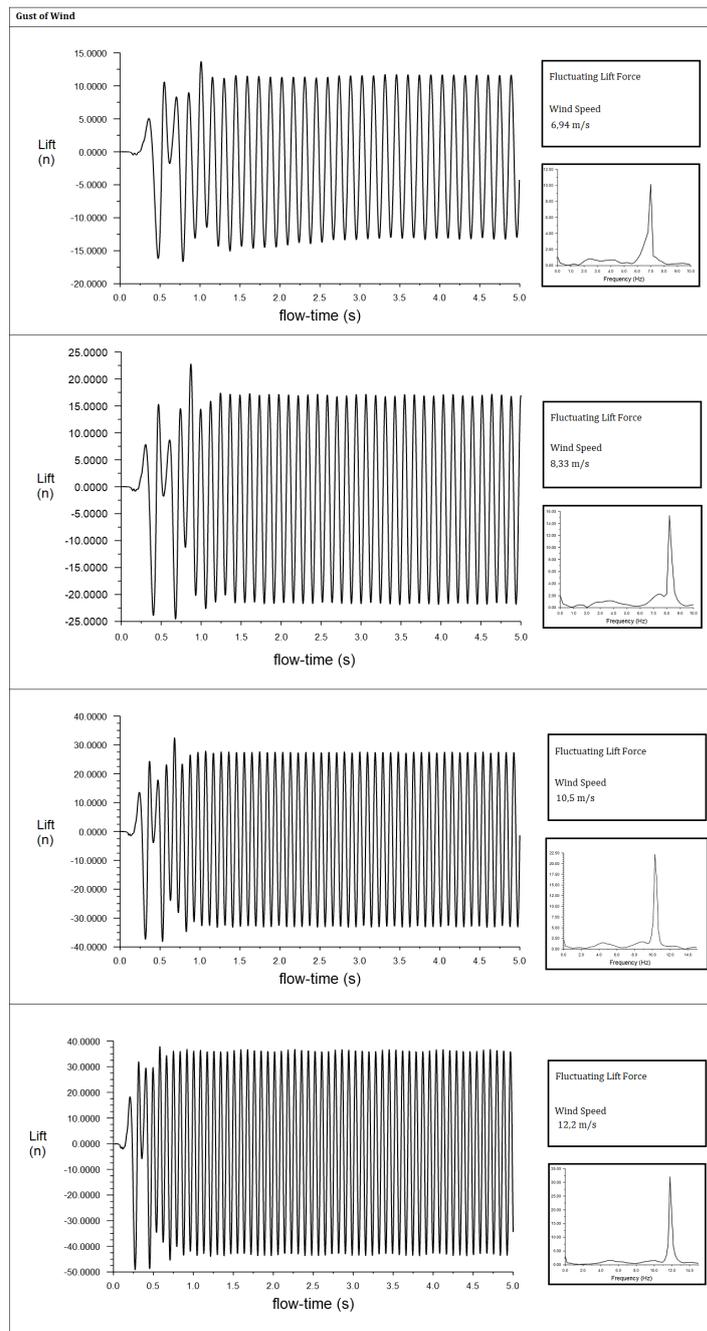
Figura 8. Contorno de vorticidad con caudal de viento de 2.77 m/s en un ambiente libre



También se han analizado las fluctuaciones causadas por las ráfagas de viento más frecuentes en los datos consultados. En la figura 9 se presenta las curvas dependientes del tiempo y su respectivo análisis espectral para determinar la frecuencia de oscilación. Las velocidades del viento

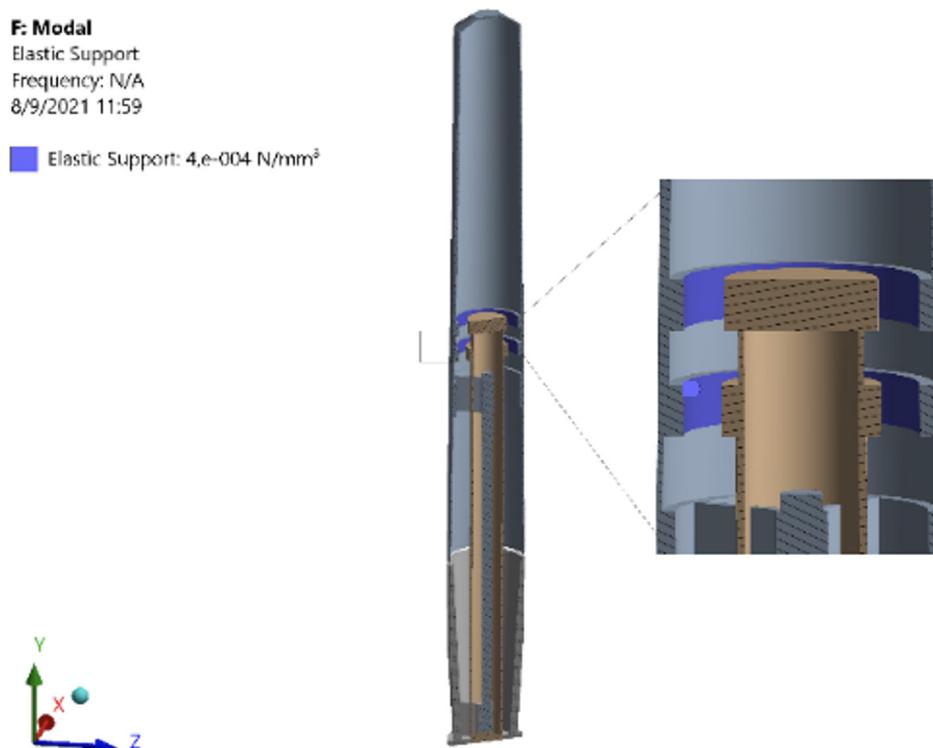
alcanzadas en las ráfagas también deben ser utilizadas y consideradas para el ajuste de la rigidez y puesta a punto de la estructura, ya que estas rachas están muy presentes a lo largo del día. Los diferentes caudales del viento causan una excitación fluctuante con su frecuencia de oscilación respectiva. Es destacable el aumento de la frecuencia y amplitud del desprendimiento de vórtices con el aumento de la velocidad de flujo del viento, lo cual genera una mayor fuerza de sustentación, fuerza que en resonancia hará que el aerogenerador vibre y, así, genere energía eléctrica.

Figura 9. Curvas de oscilación de las fuerzas de elevación y el espectro para ráfagas de viento más frecuentes



Para caracterizar la interacción fluido-estructura con los datos obtenidos, se ha establecido una fluctuación totalmente armónica de fuerza constante, con las magnitudes de oscilación en los transitorios, a lo largo de todo el mástil para así estudiar la respuesta armónica de la estructura con los diferentes modos de vibración natural. Para lograr sintonizar la frecuencia del desprendimiento de vórtices con la frecuencia natural, se ha parametrizado un soporte elástico variable en las zonas de amortiguamiento (figura 10) para ajustar la rigidez de toda la estructura. Estos soportes simulan el sistema de imanes fijos que sintonizan o ajustan las frecuencias para lograr resonancia.

Figura 10. Soporte elástico para ajuste de amortiguación y rigidez



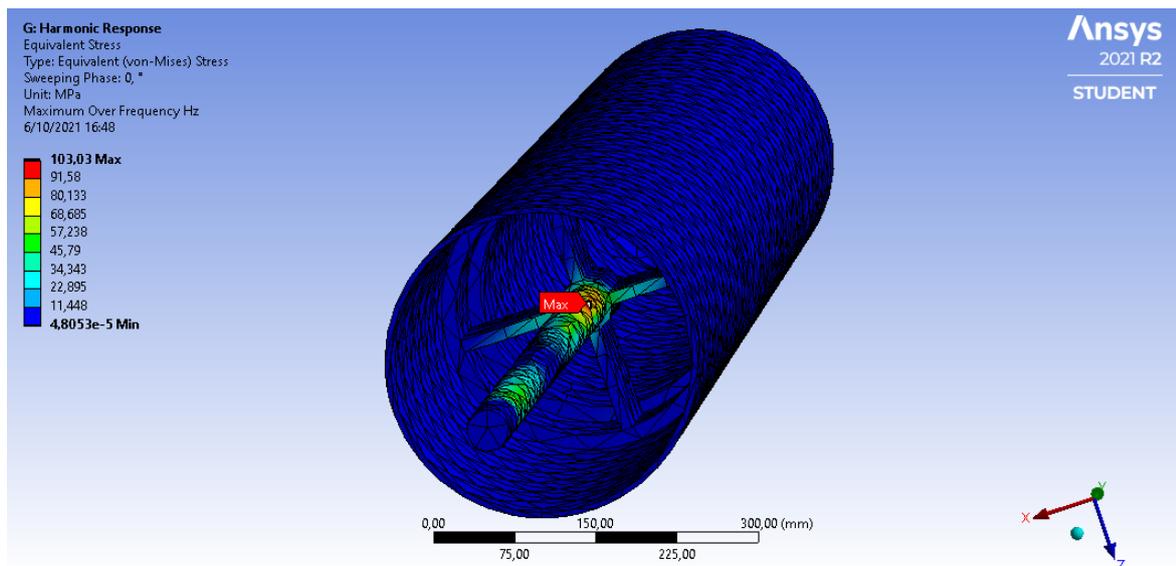
La rigidez necesaria para asemejar la frecuencia natural de la estructura a la de la excitación del viento varía según la intensidad en la que este fluye. En la tabla 2 constan las magnitudes en los soportes para sintonizar las frecuencias y así lograr resonancia. Analizando el desplazamiento vibratorio provocado por la oscilación, se puede ver que existe una disminución de la amplitud con la que vibra con el aumento de la rigidez hasta desaparecer a altas frecuencias. Esto es favorable para la dinámica del aerogenerador que trabaja en rangos bajos de velocidad del viento y se detiene con ráfagas muy altas evitando altas tensiones en la estructura y las fracturas. Utilizando el sistema de imanes fijos para amortiguar la estructura se puede automatizar el aumento de rigidez necesario para sintonizar la estructura con la excitación y alcanzar la resonancia. Esto se logra aprovechando las propiedades de respuesta entre dos imanes que se acercan con el mismo polo; es decir, la fuerza de repelencia es mayor, cuanto más se acercan el uno al otro (Domínguez Martínez et al., 2018).

Tabla 2. Ajuste de la rigidez de la estructura para conseguir resonancia con la velocidad media del viento y las ráfagas de viento más frecuentes

Velocidad del viento	Frecuencia de desprendimiento de vórtice	Magnitud del aumento de la rigidez en los soportes	Frecuencia natural con soporte de amortiguación	Desplazamiento máximo en resonancia
Velocidad media				
2.77 m/s	2.62 Hz	3.7E-4 N/mm ³	2.61 Hz	130 mm
Estalla				
6.94 m/s	7 Hz	5E-2 N/mm ³	7.04 Hz	118 mm
8.33 m/s	8.2 Hz	0.12 N/mm ³	8.2 Hz	102 mm
10.55 m/s	10.3 Hz	0.29 N/mm ³	10.31 Hz	70 mm
12.2 m/s	11.8 Hz	0.43 N/mm ³	11.78 Hz	62.8 mm

Como se esperaba y se puede ver en la tabla 2, es posible sintonizar la frecuencia excitante con la frecuencia natural variando la rigidez de la estructura. De esta forma se obtiene resonancia que se traduce en un movimiento vibratorio, el cual, a través de un alternador, puede transformarse en energía eléctrica para microconsumo. Con aerogeneradores de este tipo, pero más pequeños y de diferente mástil, se ha podido lograr entre 9 y 20 W para velocidades de 4 y 6 m/s (Buela & et al, 2021, junio 26). Vortex Bladless presentó su aerogenerador Tacoma de 2.75 m con potencias estimadas de entre 0 y 100 W proporcionales a la potencia disponible del viento. La potencia disponible observada en el estudio está en un rango de 5.5 W-430 W, que generan una oscilación con frecuencia media 7.21 Hz en la estructura y desplazamientos máximos de 13 cm con respecto al eje de inercia, con lo que se puede esperar una potencia similar a lo estimado de hasta 100 W, por cada dispositivo puesto en marcha.

Figura 11. Esfuerzos equivalentes (Von Misses) en la varilla de oscilación central causada por la vibración

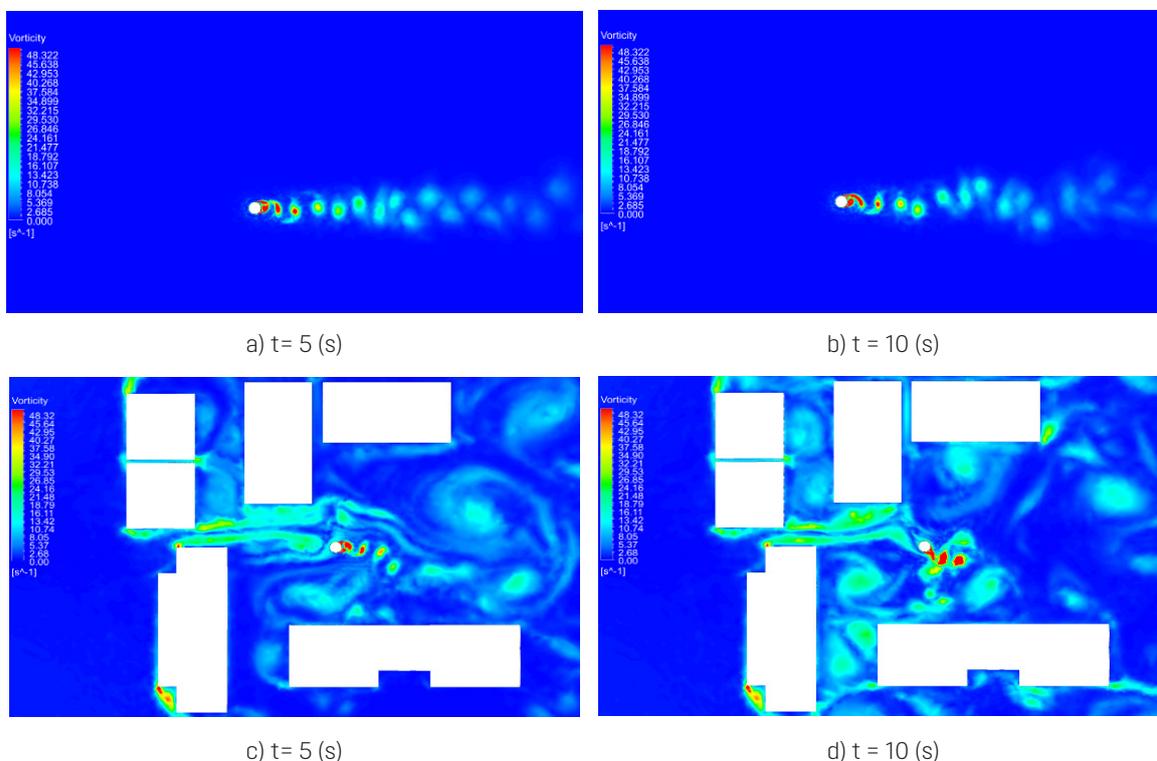


La respuesta de la estructura es parecida para los diferentes estímulos. Calibrando los soportes de amortiguación, puede definirse el rango de funcionamiento del aerogenerador para adaptarse a las condiciones ambientales donde operará. Mecánicamente, la varilla central de fibra de carbono (290 GPa) es la que recibe la carga y la única parte de la estructura que se deforma. Esta parte es la más propensa a fallar y fracturarse, sin embargo, esta varilla es fácil de reemplazar y no constituye un gasto mayor porque es una varilla delgada. En la figura 11 se ilustran las tensiones equivalentes de Von Mises que actúan sobre la varilla, las cuales mostrarían las áreas más afectadas por el movimiento y, por lo tanto, las posibles zonas de fractura.

3.2 Influencia del entorno urbano en el desprendimiento de vórtices

Utilizando la velocidad media del viento más frecuente, se ha analizado la influencia del entorno urbano, donde los edificios actúan como obstáculos al viento, lo cual afecta la interacción del fluido con la estructura. Con el modelo 2D transitorio se simula el flujo de viento sobre el aerogenerador instalado en un entorno con casas y edificios que intervienen en el mismo plano. Asimismo, se compara con el modelo no obstaculizado para determinar las variaciones más importantes que existen al instalar en un campo abierto y en el centro de una ciudadela. En la figura 12, en a) y b) se muestran los contornos de vorticidad en diferentes momentos para la simulación de campo abierto, donde se puede ver una dirección constante de desprendimiento de vórtices; mientras que en c) y d) constan el flujo con obstáculos a través del tiempo, y donde se ve cómo varía la dirección de la calle de vórtices.

Figura 12. Contornos de vorticidad para un flujo de viento de 2.77 m/s



Nota: a) flujo libre a $t = 5$ s, b) flujo libre a $t = 10$ s, c) flujo con obstáculos a $t = 5$ s y d) flujo con obstáculos a $t = 10$ s.

La principal variación que existe entre los resultados de los dos modelos es la causada por obstáculos en la dirección del flujo del viento que altera directamente la dirección de la calle de vórtices en la estela dejada por el viento al cruzar la estructura del aerogenerador, a diferencia de un flujo sin obstáculos donde la dirección es constante si la dirección del viento entrante no cambia. También se puede ver que estos efectos alteran la frecuencia de desprendimiento de vórtice, con lo que en el estudio CFD no se ha podido determinar una fluctuación constante o armónica de la excitación causada por el viento principalmente porque la calle de vórtices no actúa sobre un solo eje fijo; sin embargo, se ha observado si estos efectos han sido favorables para la magnitud de la fuerza de elevación. Al ser una estructura semicilíndrica, las alteraciones en la dirección del viento no modifican su funcionamiento, porque está diseñada para trabajar de la misma manera, sea cual sea la dirección de este. De este modo, el dispositivo puede aprovechar los flujos turbulentos y las ráfagas de viento que se generan en un entorno urbano, así como trabajar en conjunto varios de estos dispositivos, porque su influencia aguas abajo es despreciable como se vio en las simulaciones dinámicas, aspecto que también es favorable para la fauna urbana.

Conclusiones

El aerogenerador sin palas aprovecha un efecto transitorio de dinámica de fluidos llamado von Karman vortex street, el cual genera una señal fluctuante en la dirección transversal a la del flujo de viento. Esta señal tiene una frecuencia característica que al acercarse a la frecuencia natural de la estructura hará que vibre y genere energía mecánica. El aerogenerador sin palas convierte esta energía mecánica en pequeñas cantidades de energía eléctrica que pueden ser utilizadas en hogares, ya sea en entornos rurales o urbanos, ajustando las condiciones de funcionamiento para aprovechar los fenómenos estocásticos que se producen en función del lugar de instalación. Junto con otros sistemas de energía renovable, es posible hacer que las ciudades y pueblos sean autosostenibles, porque consumen la misma energía que producen en el lugar donde se encuentran.

Con el fin de alcanzar el desarrollo sostenible, se busca generadores de energía eléctrica que no contaminen y que sean más eficientes a los convencionales. El aerogenerador por vibraciones inducidas es una alternativa que utiliza energía renovable del viento y no perturba significativamente el entorno donde está instalado. Funciona en condiciones de viento muy bajo, como se pudo ver en el estudio fluido-estructura, y también funcionaría correctamente en condiciones de viento cotidianas, y no es necesario que haya velocidades de viento muy altas. El aerogenerador trabaja en magnitudes de entre 2.77 m/s a aproximadamente 12 m/s aprovechando la velocidad media del viento y las rachas o ráfagas de viento que se produzca durante el día. Como se pudo constatar, la frecuencia de oscilación crece proporcionalmente al aumento de la velocidad, así como a la fuerza de elevación.

Mecánicamente, la estructura estudiada con base en el modelo de 2.75 m y diámetro nominal entre 0.3 y 0.25 m mostró condiciones adecuadas para generar energía con las condiciones ambientales en los 7 días que se recogieron los datos. La respuesta a los armónicos provocada por el desprendimiento de vórtices de viento midió una distancia de oscilación de hasta 13 cm con respecto al eje central fijo con frecuencias entre 2.62 y 11.8 Hz, oscilaciones que, teóricamente, podrían generar hasta 100 W en ráfagas de viento. Todo el esfuerzo mecánico es absorbido por la varilla central conectada al mástil, la cual alcanza tensiones equivalentes

de entre 40 y 70 MPa. Esta es la única parte que sufre deformaciones, por lo tanto, es la más propensa a fracturas y fallos.

Analizando la influencia de un área urbana con edificios pequeños en la aerodinámica del dispositivo, se pudo ver, en comparación con un área sin obstrucciones, que la dirección del viento se altera por periodos. Esto hace que la dirección de oscilación de la turbina eólica también cambie; aumenta la turbulencia en el flujo del viento, lo cual altera la amplitud de la señal de excitación y la fuerza de elevación que actúa. Sin embargo, estos cambios no alteran significativamente el funcionamiento del aerogenerador, porque se trata de una estructura semicilíndrica omnidireccional que funciona correctamente en todas las direcciones del viento, por lo tanto, constituye una gran ventaja para un dispositivo que debe instalarse en ambientes urbanos con muchas obstrucciones al fluir del viento.

Referencias

- Andrade, A. (2021, julio 27). *Objetivos de Desarrollo Sostenible en Ecuador*. Investoria Foundation. <https://bit.ly/3o0YGi4>
- Ansys, I. C. (2020). *Formulation of harmonic analysis: Introduction, complex variables and notation, displacement-velocity-acceleration, formulation and derivation, discussion*. ANSYS. <https://bit.ly/3KQJJcf>
- Buela, A., Rey, R., Unisa, F., Meris, P., Manuel, M., De la Cruz, J., & Tud, R. (2021, junio 26). Design and nonlinear static simulation of a small-scale vortex bladeless wind power generator. *2021 IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems*, Shah Alam, Malasia 185–190. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS52118.2021.9495882>
- Bustamante Campoverde, A. S. (2021). Caracterización del viento y temperatura aparente en los cañones urbanos del centro histórico de Cuenca, Ecuador. *Conservar Patrimônio*, 36, 90–105. <https://doi.org/10.14568/cp2019034>
- Comisión de Sustentabilidad Capbauno. (2020). *Ciudades sostenibles*. Capbauno Obtenido de <http://www.capbauno.org.ar/>
- Domínguez Martínez, M., Toral, F., Ghasem, H., Papadopoulou, P. S., & Papaphilippou, Y. (2018). Longitudinally variable field dipole design using permanent magnets for clic damping rings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1–4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2795551>
- Guevara Díaz, J. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra*, 29(46), 81–101. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000200006
- Hu, J., Wang, Z., Zhao, W., Sun, S., Sun, C., & Guo, C. (2020). Numerical simulation on vortex shedding from a hydrofoil in steady flow. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 195. <https://doi.org/10.3390/jmse8030195>
- Hu, Y., Yang, B., Chen, X., Wang, X., & Liu, J. (2018). Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration. *Energy Conversion and Management*, 162, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.026>
- Karaağaçlı, T., & Özgüven, N. (2021). Experimental modal analysis of nonlinear systems by using response-controlled stepped-sine testing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107023>
- López, O. D. (2002). Modelamiento computacional de la calle de vértices de karma por dinámica de verticidad. *Mecánica Computacional*, XXI, 274–292.
- Meteored. (2021). Histórico del tiempo en Quito. Quito - Aeropuerto Mariscal Sucre Intl (SEQU): Meteored.
- Peter, S., & Leine, R. (2017). Excitation power quantities in phase resonance testing of nonlinear systems with phase-locked-loop excitation. *Mechanical Systems Signal Processing*, 96, 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.011>

- Saengsaen, S., Chantharasenawong, C., & Wu, T.-L. (2019). A 2-d mathematical model of vortex induced vibration driven bladeless wind turbine. *MATEC Web of Conferences*, 291, artículo 02007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929102007>
- Spalart, P. R., & Allmaras, S. R. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aéronautique*, 1, 5-21. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
- Yáñez, D. J. (2018, enero 23). España Patente nº BR112013002403A.
- Yáñez, D. J. (2018, junio 7). *Aerogeneradores resonantes por VIV*. Vortex Bladeless S. L. https://vortexbladeless.com/?smd_process_download=1&download_id=4390

Retención de vitamina C en el procesamiento de la pulpa de copoazú (*Theobroma grandiflorum*) enlatada

(Retention of vitamin C in the processing of canned cupuassu pulp (*Theobroma grandiflorum*))

Robert Tecse-Tecsi¹, Virne Mego-Mego², Miguel Chávez-Pinchí³, Lastenia Cutipa-Chávez⁴, Luis Vargas-Vásquez⁵

Resumen

La pulpa de copoazú es un fruto de alto contenido en pectinas y ácido ascórbico cosechado en la Amazonía de América Oriental por sus características de aroma, sabor y textura. No obstante, el procesamiento de enlatado para el consumo humano en Madre de Dios (Perú) es cuestionable debido al inadecuado manejo y tratamiento térmico del fruto. El objetivo del estudio fue evaluar la estabilidad de la conservación de la vitamina C en el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada. Para ello, se llevó a cabo un diseño experimental en cuatro etapas: 1) caracterización del fruto, 2) determinación del tratamiento térmico, 3) análisis de la variación de vitamina C y 4) análisis de la pulpa enlatada. Se evaluó el efecto del proceso por triplicado y se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) para analizar las diferencias estadísticas mediante el programa Statgraphys Centurion. Entre los resultados se destaca que el pH (3.05 ± 0.50) y acidez (1.54 ± 0.80) del enlatado guardan semejanza con la materia prima. Asimismo, se encontró un aumento significativo de sólidos solubles (Brix) respecto al fruto fresco. Se concluye que la retención total de vitamina C de la pulpa de copoazú enlatada fue 49.10 %.

Palabras clave

Theobroma grandiflorum, ácido ascórbico, pasteurización, enlatado, tratamiento térmico

Abstract

The cupuassu pulp is a fruit with a high content of pectins and ascorbic acid harvested in the Amazon of Eastern America for its exquisite characteristics of aroma, flavor and texture; however, the processing of canned food for human consumption in Madre de Dios - Peru is questionable, due to the inadequate handling and heat treatment of the fruit. The objective of the study was to evaluate the stability of the preservation of vitamin C in the processing of canned cupuassu pulp. For this, an experimental design was carried out in four stages: 1) characterization of the fruit, 2) determination of the heat treatment, 3) analysis of the variation of vitamin C and 4) analysis of the canned pulp. The effect of the process was evaluated in triplicate and a Completely Random Design was applied to analyze the statistical differences using the Statgraphys Centurion program. Among the results, it stands out that the pH (3.05 ± 0.50) and acidity (1.54 ± 0.80) of the canning are similar to the raw material. Likewise, a significant increase in soluble solids (Brix) was found with respect to fresh fruit. It is concluded that the total retention of vitamin C of the canned cupuassu pulp was 49.10 %.

Keywords

Theobroma grandiflorum; ascorbic acid; pasteurization; canned; heat treatment

- 1 Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Puerto Maldonado, Perú. [06210027@unamad.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-3768-1033>]
- 2 Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Puerto Maldonado, Perú. [vmego@unamad.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-5800-7430>]
- 3 Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Puerto Maldonado, Perú. [mchavez@unamad.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-7431-5871>]
- 4 Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Puerto Maldonado, Perú. [lcutipa@unamad.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-3341-1095>]
- 5 Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú. [lmvargas@unsm.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-4418-107X>]

1. Introducción

Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) es una palabra compuesta que proviene de la lengua tupi, *kupu* significa "similar al cacao" y *uasu* "genial" (Gondim et al., 2001). El copoazú es un fruto del mismo género del cacao que se destaca, en la Amazonía de América Oriental, por su potencial económico en el mercado nacional e internacional (Ramos et al., 2020) al ser utilizado como ingrediente de bebidas de zumo de frutas, mermeladas, gelatinas, caramelos y productos lácteos.

El creciente interés económico en este fruto ha generado el desarrollo de nuevas industrias y ha impulsado investigaciones en el sector alimenticio (Ana L. F. Pereira et al., 2018). Esto se debe a sus características relacionadas con el aroma, el sabor, la textura y el alto contenido de pectinas de la pulpa (Maciel et al., 2020). Así lo revelaron Costa et al. (2015), quienes demostraron que los polisacáridos de la pectina del copoazú mejoran la textura de yogures de leche de cabra, por lo que se ha considerado su utilidad en la industria caprina lechera. El estudio de Pereira et al. (2017) es otro ejemplo. Los autores observaron que la pulpa es propicia para el desarrollo de probióticos, ya que presentó ventaja tecnológica como sustrato para la fermentación probiótica, debido a su composición de azúcares naturales y ácidos orgánicos.

La pulpa de copoazú representa el 38 %-43 % de la fruta y es rica en ácido ascórbico (vitamina C), con 102 mg/100 g. Contiene alta concentración de compuesto fenólicos (3.5-4.9 mg de equivalente de catequina/g de muestra de peso seco), actividad antioxidante (1.7-2.0 μ M Trolox/g) y potencial de fibra dietética (0.50 %-2.12 %) (Pugliese et al., 2013; Salgado et al., 2011). La pulpa que rodea la semilla puede ser extraída de forma manual o mecánica, y es procesada mediante pasteurización, enlatado y/o congelado (Gondim et al., 2001).

Durante este proceso, las vitaminas hidrosolubles de la pulpa de copoazú presentan cambios, sobre todo la vitamina C. Esta es lábil en presencia de oxígeno y rápida en oxidación a temperaturas elevadas (Badui Dergal, 2006; Bouzari et al., 2015). Estos factores repercuten en la calidad organoléptica y son precursores de cambios de la actividad antioxidante que reducen el valor nutricional del fruto (Amit et al., 2017; Cole et al., 2018).

La Amazonía peruana de Madre Dios, ámbito geográfico de este estudio, produce frutales de copoazú a gran escala para el consumo humano y para fines comerciales (Peña Valdeiglesia & Alegre Orihuela, 2017). Entre los productos elaborados en la región se destaca el enlatado en almíbar de la pulpa; sin embargo, se ha identificado que el proceso de la manufactura no brinda cuidado o importancia al de enlatado, por lo que es cuestionable el tratamiento del fruto para conservar sus valores nutritivos.

La etapa de pasteurización es determinante para elaborar estos alimentos, porque en ella se evalúa el tratamiento térmico óptimo para producir productos inocuos que favorezcan la conservación de vitamina C (Ghoshal, 2018). Por ello, es reconocido que el inadecuado proceso de enlatado de la pulpa de copoazú puede reducir el aporte nutricional y producir enfermedades que se transmiten por alimentos manipulados inapropiadamente (Titus et al., 2018).

Se desconocen trabajos enfocados en la retención de vitamina C durante el procesamiento de enlatado de la pulpa de copoazú o del género *Theobroma*, a pesar de que la literatura muestra publicaciones disímiles en diferentes periodos. De ellas, al 2021, según la base de datos de Web of Science, se publicaron trabajos de Das Neves Selis et al., 2021; De Oliveira et al., 2021; Silva et al., 2021; Tenea & Ortega, 2021. No obstante, existen antecedentes de que se ha evaluado la retención de vitamina C en frutas como naranja (Maeda & Mussa, 1986), mango (Ahmed et al., 2005), manzana anacardo (Emelike & Ebere, 2015), papaya (Avila-Gaxiola et al., 2016)

y albaricoque (Adkison et al., 2018). A partir de este panorama, se planteó la siguiente hipótesis: el procesamiento adecuado de la pulpa de copoazú enlatado garantiza el uso comercial en empresas agroindustriales, además de permitir la reducción óptima de la vitamina C.

Es pertinente investigar la conservación de la vitamina C durante el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada para conocer pérdida o retención total de la vitamina y, a partir de ello, determinar un protocolo adecuado en los procesos industriales para obtener pulpa pasteurizada, con el propósito de adecuar un proceso cinético que conserve el valor nutritivo y calidad alimenticia para el consumo humano. En este sentido, el objetivo del estudio fue evaluar la estabilidad de la conservación de la vitamina C en el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada.

2. Metodología

Lugar de estudio

La investigación se efectuó, durante el año 2017, en las instalaciones de la Planta Piloto de Tecnología de Alimentos y Productos Agropecuarios y en los laboratorios de físicoquímica de Calidad Total La Molina, de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina. La materia prima (copoazú) en estado fresco se obtuvo de la provincia de Tambopata, distrito Iberia, departamento de Madre de Dios (Perú).

Diseño experimental y tratamientos

Se realizó un estudio de tipo básico porque el propósito fue ampliar los conocimientos, sin fines aplicativos, de la conservación de la vitamina C en el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada. Asimismo, se usó un nivel descriptivo, debido a que se describió sistemáticamente los experimentos hechos tanto del flujo del procesamiento tecnológico para obtener la pulpa de copoazú enlata como del tratamiento térmico. Así, el diseño que se empleó fue experimental y se constituyó en cuatro etapas.

En la etapa 1 se caracterizaron los frutos del copoazú según análisis físico-químico y análisis microbiológico, este último de acuerdo con la norma del Ministerio de Salud N° 071-MINSA/DIGESA-V0.1 (2008) para semiconservas de pH < 4.6.

En la etapa 2 se determinó el tratamiento térmico en la elaboración de la pulpa de copoazú enlatada. Para ello, se utilizó un envase de acero de hojalata de capacidad nominal de 15 oz/430 ml, diámetro 73 mm y altura 11 cm. La tapa del envase fue de hojalata barnizada. Se utilizó el programa Data Trace Temp System para el monitoreo de la cinética de calentamiento a 100 °C (agua en ebullición) y enfriamiento a un punto equidistante de 1/2 y 1/3 de distancia desde la base.

Además, se determinó las unidades de pasteurización (UP) para reducir la población microbiana inicial (bacteria ácido láctica, mohos y levaduras) en el producto antes de ser sometido a tratamiento térmico. Esta reducción fue determinada según nivel de aceptabilidad de riesgo asumible propuesto por Hurtado (1987), que utiliza como referencia el *Byssochlamys fulva* (moho de mayor termo resistencia), cuya temperatura es 93.3 °C, D= 1 min y Z= 8.9 °C.

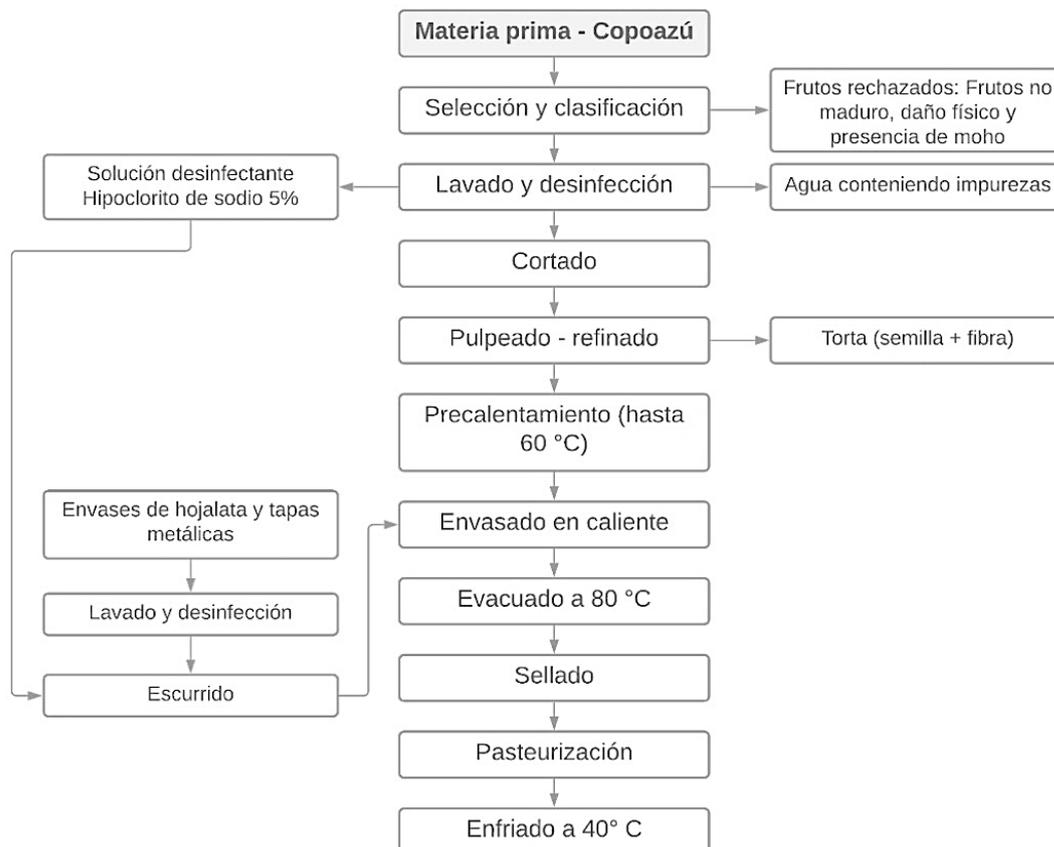
Seguidamente, se sometió la pulpa a tratamiento térmico de 100 °C para determinar el tiempo de proceso. Se colocaron sensores en la pulpa de copoazú envasada para controlar el punto más frío, la temperatura del producto y el tiempo en el que se acumula la letalidad deseada. Según estos resultados, se trató térmicamente el producto (muestra por duplicado) proce-

sando los datos a través del método general por la técnica de rectángulos y los métodos de la fórmula de Stumbo (1973), y así se pudo verificar el cumplimiento de los parámetros obtenidos en el diseño.

Por último, se evaluaron los datos generados en el tratamiento térmico mediante el método general o gráfica. Estos resultados se corroboraron con los datos generados por el programa Data Trace Temp System. Se calculó los factores de las curvas de calentamiento y enfriamiento mediante el método de Stumbo.

En la etapa 3 se determinó la variación de vitamina C durante el proceso de elaboración de la pulpa de copoazú, que pasa por etapas de mínimos procesos como el pulpeado y pasteurizado, calculando los porcentajes parciales y acumulados de cada etapa. Además, se determinó la retención de dicho compuesto en comparación con la composición inicial del fruto fresco. En la figura 1 se muestran las etapas del proceso tecnológico que se estableció para obtener la pulpa de copoazú enlatada.

Figura 1. Etapas del proceso tecnológico para la obtención de pulpa de copoazú enlatada



Se separaron los frutos de copoazú deteriorados por daños mecánicos, físicos o biológicos; luego fueron lavados para separar los contaminantes adheridos a la materia prima con una escobilla doméstica. Los frutos se lavaron mediante inmersión en agua con hipoclorito de sodio 0.5 %-1.0 %, por el lapso de 10 min, y se rompieron empleando un mazo para extraer la masa pulpa y la semilla. La etapa de pulpeado-refinado se hizo en una pulpeadora (malla con orificios

de 2.9 mm de diámetro). La pulpa obtenida se refinó en una malla con orificios de 0.5 mm de diámetro, lo cual separó la fibra y la semilla.

En la etapa de precalentamiento se envasó la pulpa caliente en envases de hojalata. Estas fueron previamente lavadas, desinfectadas y escurridas con solución de hipoclorito de sodio 0.5 %. Para formar el vacío en los envases, se hizo el proceso de evacuado a través de una cadena transportadora hasta el *exhauster*, donde atravesó el túnel en un lapso de 5 min a temperatura de 80 °C. Finalizado el proceso, los envases fueron cerrados herméticamente.

La pulpa enlatada se sometió a la pasteurización (100 °C) durante 40 min. Los envases se colocaron en el interior de una canastilla de metal y, posteriormente, se los introdujo en la autoclave horizontal. El producto enlatado se enfrió hasta llegar a 40 °C aproximadamente y fue almacenado a temperatura ambiente.

Por último, la etapa 4 consistió en caracterizar la pulpa de copoazú después de su procesamiento, según análisis físicoquímico y análisis microbiológico.

Análisis estadístico

Se evaluó el efecto del procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada en la variación de la vitamina C por triplicado. Los resultados fueron expresados como la media de tres dimensiones \pm error estándar, estos se compararon entre sí y con respecto a la materia prima. Para ello, se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) en la etapa 2 y 3, se analizaron las diferencias estadísticas entre las medias, considerando 95 % ($p < 0.05$) de intervalo de confianza. Se empleó un factor categórico (proceso de producción de la pulpa enlatada en copoazú) con tres niveles referentes a las etapas del proceso: materia prima, pulpeado y pasteurizado. Para el análisis de varianzas y pruebas de comparación de Tukey, se lo hizo a través del programa Statgraphics Centurion XV. II.

3. Resultados y discusión

Análisis de materia prima

El análisis físicoquímico de la pulpa de copoazú fresco arrojó valores de humedad (g) equivalentes a 88.8 ± 0.03 , proteína 0.85 ± 0.02 , extracto etéreo (g) 0.02 ± 0.02 , fibra (g) 1.22 ± 0.01 , ceniza (g) 0.67 ± 0.01 , carbohidratos (g) 13.67 ± 0.03 , pH 3.00 ± 0.02 , Brix 11.3 ± 0.01 y acidez (g) 1.51 ± 0.02 . Estos resultados se asemejan a lo expuesto por Vriesmann y De Oliveira Petkowicz (2009) y Canuto et al. (2010), quienes reportaron que la pulpa presenta pH de 3.5 ± 0.02 y acidez entre 1.50 %-200 %.

Respecto al análisis microbiológico, se obtuvo 1 000 UFC/g de hongos totales y 11 x 100 000 UFC/g de levadura. El valor encontrado fue bajo, porque el fruto de copoazú tiene un caparazón que lo recubre de forma natural de daños microbiológicos y físicos (Ana L. F. Pereira et al., 2018). Este análisis se realizó para identificar la carga microbiana de la materia prima y calcular tanto los parámetros cinéticos para frutas en conservas (*Byssochlamys fulva*) como los datos de penetración de calor en el enlatado para determinar el valor de pasteurización requerido en el procesamiento de la conserva de copoazú.

Tratamiento térmico

El sensor colocado a 1/3 de distancia respecto a la tapa del envase de la pulpa de copoazú arrojó un valor $P^{8,9}_{100}$ (pasteurización equivalente) de 4.1. En cuanto al sensor colado a 1/2, este arrojó un valor de 4.5. La tabla 1 muestra que el punto más lento de calentamiento está ubicado a 1/3 de altura desde la base (punto medio entre la base y el centro), ya que la velocidad de calentamiento (fh) es menor en dicho punto (mayor dependiente). La tabla 2 muestra que la velocidad de enfriamiento (fc) también fue menor a distancia de 1/3.

Tabla 1. Puntos más fríos durante el calentamiento

Calentamiento			
Selección del envase evaluadas		1/3 desde la base	1/2 altura desde la base
Tr (°C): Retorta	100	M4T11718	M4T11741
Pendiente	1/fh	-0.0205	-0.0217
Intercepto	$\log(\text{Tr}-\text{Tpih})$ en $t=0$	1.8389	1.8516
To: Temperatura inicial		56.10	55.6
Tpih (°C): Temperatura pseudo inicial		47.52	48.71
fh: Velocidad del calentamiento		48.78	46.08
Jh: Factor de retraso		1.20	1.16

Nota. Prueba realizada por duplicado

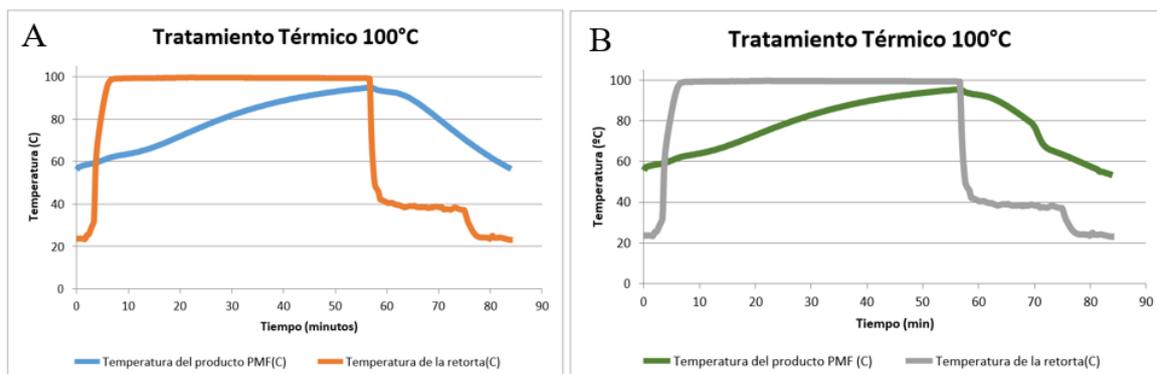
Tabla 2. Puntos más fríos durante el enfriamiento

Calentamiento			
Selección del envase evaluadas		1/3 desde la base	1/2 altura desde la base
Tr (°C): agua de enfriamiento	20	M4T11718	M4T11741
Pendiente	1/fh	-0.0152	-0.0169
Intercepto	$\log(\text{Tr}-\text{Tpih})$ en $t=0$	1.9768	1.9582
Tpih (°C): Temperatura pseudo inicial		114.80	110.82
fc: Velocidad del calentamiento		65.36	59.17
Jh: Factor de retraso		1.27	1.21

Nota: Prueba realizada por duplicado

La figura 2 muestra las historias de tiempo-temperatura del procesamiento de pulpa de copoazú enlatada. Las nomenclaturas de las muestras fueron las siguientes: R1) M1 y M2: muestras correspondientes al primer tratamiento y R2) M3 y M4: muestra correspondientes al segundo tratamiento.

Figura 2. Historia tiempo-temperatura de muestra de pulpa la de copoazú enlatada



Nota: A) primera muestra. B) segunda muestra

El análisis de los gráficos permitió obtener información de los valores de P_o al final de la pasteurización (tabla 3). Se observa que el tratamiento (R1) presenta un menor valor P_o , correspondiente al segundo tratamiento (R2). Además, este tratamiento (R1) presenta el mayor valor f_h (47.78), que permite confirmar como punto de calentamiento más lento.

Tabla 3. Características de las curvas de penetración de calor de cada tratamiento

Tratamiento	m	f_h	T_o	P_o final de pasteurización
R1	-0.0205	48.78	56.10	4.10
R2	-0.0217	46.08	55.60	4.50

Nota: Prueba realizada por duplicado

Los parámetros de penetración de calor para el calentamiento y enfriamiento del enlatado de la pulpa de copoazú se muestran en la tabla 4. Se observa que los valores de f_h y f_c presentan una diferencia de 16.58 min con un 25.37 % respecto al valor f_h . Esta diferencia indicaría que la transferencia de calor es una combinación de convección y conducción pura. Según Sharma et al. (2003), en los productos que se calientan por convección, el punto más frío se sitúa sobre el eje vertical ligeramente más abajo del centro geométrico. Por esta razón, se confirma que el calentamiento de la pulpa de copoazú se realizó por convección lenta. Se calculó el valor P_o objetivo en función del moho *Byssoschlamys fulva* mediante la siguiente fórmula:

$$UP = D_r (\log a - \log b)$$

$$UP = P_{93.3} = D_{93.3} (\log a - \log b)$$

$$P_{93.3} = 1 \times (\log 1000 - \log 1 \times 10^{-2})$$

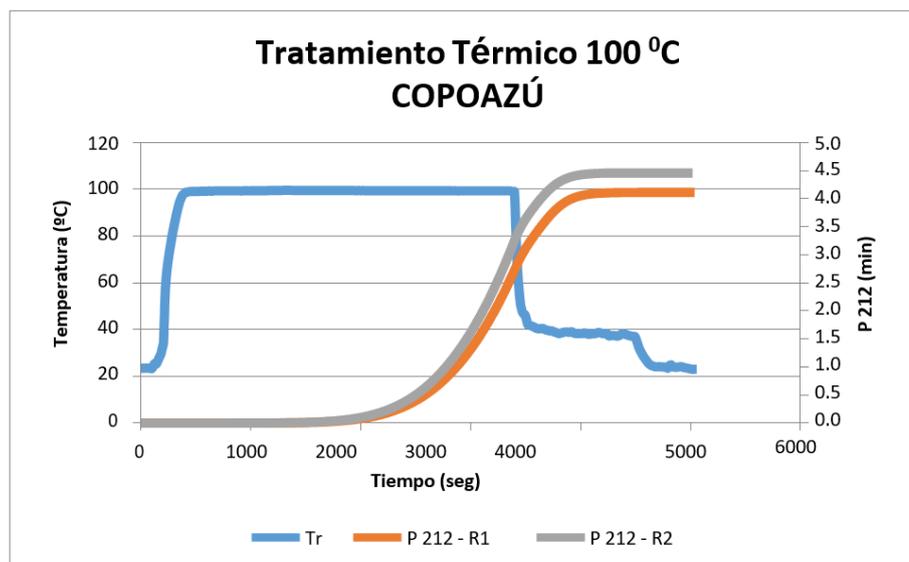
$$P_{93.3} = 5 \text{ min}$$

Tabla 4. Parámetros de las curvas de calentamiento y enfriamiento

Calentamiento		Enfriamiento	
fh	48.78 ± 1.54	fc	65.36 ± 1.78
To (°C)	56.10 ± 0.44	Tic = Tg (°C)	94.90 ± 0.45
lh = TR - To (°C)	43.90 ± 0.23	lc = Tg - Tc (°C)	74.90 ± 0.28
JhIh = TR - Tpsi h (°C)	52.48 ± 0.67	JcIc = Tpic - Tc (°C)	94.80 ± 0.63
Tpsi h (°C)	47.52 ± 5.99	Tpsi c	114.80 ± 5.66
Jh	1.20 ± 0.32	Jc	1.27 ± 0.38

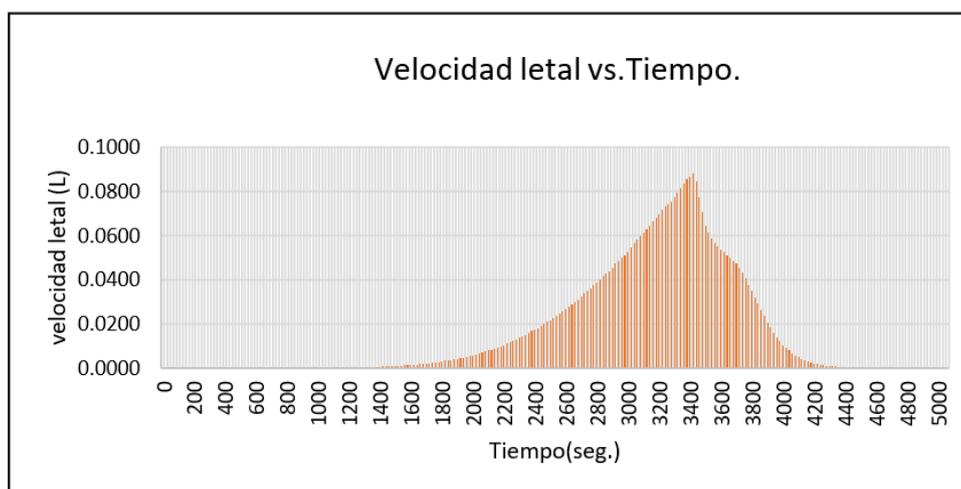
Nota: Prueba realizada por duplicado

La UP por el método general mejorado se determinó a temperatura de 100 °C, para lo cual se calculó 2.07 min, pero, teniendo en cuenta un margen de seguridad, se obtuvo 2.10 min a temperatura máxima de calentamiento del producto (figura 3).

Figura 3. Determinación de la UP por el método general

La UP, a partir del método de Stumbo para el proceso de tratamiento R1, arrojó como valor 4.02 ± 0.34 min. El mismo método se aplicó para determinar el tiempo de procesamiento para temperatura a 100 °C, que resultó 28.35 ± 0.34 min. En cambio, por el método general, la suma de la letalidad conseguida en el tiempo de proceso fue de 46.60 min con los que se alcanzó 4.10 min de UP. La figura 4 muestra la acumulación de la velocidad letal (área bajo la curva) en cada intervalo de tiempo evaluado (20 segundos).

Figura 4. Curva de la velocidad letal (L) a 100 °C



Los resultados obtenidos de la UP por ambos métodos (tabla 5) fueron corroborados con los cálculos establecidos del valor UP objetivo (5 min). Se puede ver que en el tratamiento R1 el valor obtenido por el método general fue el más cercano (4.10 min).

Tabla 5. Características de las curvas de penetración de calor de cada tratamiento

Tratamiento	UP (min)		Tiempo de proceso (min)	
	General	Stumbo	General	Stumbo
R1	4.10	4.02	46.66	28.35

En su estudio, Vieira et al. (2001) sostienen que la reducción de cargas microbianas a un nivel seguro por pasteurización evita cambios en los atributos de calidad de un producto. Así, en su investigación, Vieira et al. (2000) determinaron que los parámetros cinéticos de degradación térmica del ácido ascórbico y dehidroascórbico (25 % de pulpa y 15 % de azúcar) se hallaron en la pasteurización en el rango de 60 °C-100 °C usando el método isotérmico. En relación con presente resultado, la UP se determinó a 100 °C mediante el método general y método Stumbo. Se estima que las diferencias de los procesamientos (néctar y enlatado) son criterios determinantes para el tratamiento térmico de la fruta de copoazú y estas presentan diferentes condiciones que minimizan la degradación de la vitamina C.

La temperatura de 100 °C se justifica porque la pulpa de copoazú es un producto ácido que requiere tratamientos de pasteurización y no esterilización, dado que resultaría excesivo desde el punto de vista tecnológico y presumiblemente económico. Pokorny (2005) indica que aplicar temperatura moderada (100 °C como máximo) reduce los cambios negativos que se producen en la calidad nutritiva del alimento.

Estabilidad de vitamina C

La tabla 6 muestra la variación del contenido y retención de vitamina C durante el proceso de producción de la pulpa de copoazú enlatada. En el caso del fruto fresco se obtuvo 29.78 mg/100 g base húmeda (b.h). En la etapa de pulpeado se obtuvo una pérdida de 31.87 %. Esto se atribuye a la reducción de tamaño de partícula y el consecuente incremento significativo de la superficie

expuesta al oxígeno del aire y al oxígeno contenido en las células del fruto, así como a la liberación de enzimas de los tejidos. En cuanto al contenido de vitamina C durante el pulpeado, se obtuvo un valor de 20.29 mg/100 g. Después del proceso de pasteurización, el ácido ascórbico se redujo 14.62 % b.h. Estas reducciones en el proceso de obtención de pulpa envasada y pasteurizada suceden probablemente porque la vitamina C es termolábil e hidrosoluble.

La retención total fue 49.10% ± 0.83 b.h, por lo tanto, la pulpa de copoazú tratada obtuvo un valor de 14.62 mg/100 g. Resultados superiores de retención de ácido ascórbico se constataron en el néctar de pulpa de guayaba rosada (*Psidium guajava* L.) con 89.3 % (Ordóñez-Santos & Vázquez-Riascos, 2010), así como en el néctar de la pulpa de zarzamora (*Rubus fruticosus* L.) con 75.9 % (Valencia Sullca & Guevara Pérez, 2013).

En su estudio, Emelike & Ebere (2015) encontraron una reducción significativa de vitamina C en el jugo de anacardo (48 mg/100 ml) pasteurizado a 80 °C. Además, Avila-Gaxiola et al. (2016) hallaron, a través del procesamiento de temperatura de retorta constante, que la retención de la vitamina C en puré de papaya en conserva fue de 65.71%.

Estas diferencias se deben a las formulaciones empleadas, especialmente a la proporción de la dilución de la materia prima y al ajuste del pH, así como a la severidad del tratamiento térmico. No obstante, McGinnis et al. (2020) afirman que las frutas enlatadas, congeladas o frescas retienen niveles similares de nutrientes y las tres son recomendadas para el consumo humano.

Tabla 6. Variación de vitamina C (b.h) durante el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada

Etapas del proceso	Promedio (mg/100 g b.h)	Variación (%)	Variación acumulada (%)	Retención (%)
Materia prima (Copoazú fresco)	29.78 ± 0.74	-	00.00	100.00 ± 0.00
Pulpeado	20.29 ± 0.52	31.87	31.87	68.13 ± 1.44
Pasteurizado (pulpa de copoazú)	14.62 ± 0.42	19.03	50.90	49.10 ± 0.83
Pérdida total (%)	50.90 ± 0.88	-	-	-

Nota: Análisis realizado por triplicado en base húmeda ± desviación estándar

La tabla 7 muestra diferentes estadísticos de ácido ascórbico para cada uno de los 3 niveles de procesos de producción, teniendo en cuenta que la máxima retención es a nivel de la materia prima. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles.

Tabla 7. Resumen estadístico para ácido ascórbico de acuerdo con la retención por cada proceso

Tratamiento o proceso de producción	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo	Rango
1) materia prima	3	100.00	0.0	0.0 %	100.0	100.0	0.0
2) pulpeado	3	68.13	0.7147	1.0490 %	67.36	68.77	1.41
3) pasteurizado	3	49.10	0.9118	1.8569 %	48.05	49.66	1.61
Total	9	72.41	18.319	25.298 %	48.05	100.0	51.94

La tabla 8 de ANOVA descompone la varianza de ácido ascórbico en dos componentes: uno entre grupos y uno dentro de grupos. El F-Ratio, que en este caso es 3 314.17 igual, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Asimismo, el P-Value de la prueba -F es menor que 0,05, donde existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de ácido ascórbico entre los niveles de proceso de producción, medidos con un nivel del 95 % de confianza.

Tabla 8. ANOVA para vitamina C por tratamiento

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado de medio	F-Ratio	P-Value
Entre grupos	3 968.1	2	1 984.05	3 314.17	0.0000
Dentro de grupos	3 59193	6	0.598656		
Total (Corr.)	3 971.69	8			

Análisis de la pulpa de copoazú enlatada

Los análisis fisicoquímicos realizados al producto fueron procesados a partir de parámetros que maximizan la retención de ácido ascórbico. Estos fueron peso bruto (g) 485.4 ± 1.30 , peso drenado (g) 435.4 ± 1.6 , peso del envase (g) 50 ± 2.20 , presión de vacío (pulg. Hg) 13 ± 0.50 , espacio de cabeza (mm) 8 ± 0.50 , pH 3.05 ± 0.50 , acidez (%) 1.54 ± 0.80 y sólidos solubles (Brix) 12.10 ± 0.40 .

La determinación del pH y acidez del producto terminado fue pertinente, debido a que se mantiene igual al producto fresco, es decir, 3.05 y 1.54 respectivamente, lo cual muestra una mínima variación. Por el contrario, los sólidos solubles (Brix) aumentaron significativamente con respecto al fruto fresco.

En cuanto al análisis microbiológico, luego de la pasteurización no se detectó la presencia de mohos, levaduras y bacterias ácido lácticas (< 10 UFC/g), por lo que se cumple con los límites (10^{-2} UFC/g) para productos con pH < 4.6 (semiconservas) regidos por la norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano (NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, 2008).

5. Conclusiones y recomendaciones

El ANOVA del proceso de obtención de pulpa enlatada y pasteurizada, medida en la degradación del ácido ascórbico, presenta un P-Value de la prueba -F un valor de 0.000, valor que es menor que 0.05, por lo tanto, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de ácido ascórbico y los niveles de proceso de producción (materia prima, pulpeado y pasteurizado), medidos con un nivel del 95 % de confianza. Esta diferencia existe porque la vitamina C es termolábil e hidrosoluble y, en las diferentes etapas del proceso de producción, la pulpa de copoazú es sometida a distintas reacciones por presencia de oxígeno y cambios de temperatura que afectan al contenido de vitamina C.

Según los resultados, el ácido ascórbico (b.h) del copoazú fresco (29.78 ± 0.74 mg/100 g) disminuyó progresivamente durante el pulpeado (20.29 ± 0.52 mg/100) y la pasteurización

14.62 ± 0.42 mg/100 g, por lo que la pérdida total es de 50.90 ± 0.88 mg/100 g, con una retención total de 49.10 % ± 0.83.

Este estudio es el primer acercamiento a la evaluación de estabilidad de vitamina C en el procesamiento de la pulpa de copoazú enlatada, por lo tanto, será pertinente para la industria alimentaria. Se recomienda llevar a cabo trabajos científicos que determinen el tratamiento térmico de pasteurización sobre la retención de compuestos bioactivos y fenológicos en la pulpa enlatada de copoazú, así como su efecto en la capacidad antioxidante.

Referencias

- Adkison, E. C., Biasi, W. B., Bikoba, V., Holstege, D. M., & Mitcham, E. J. (2018). Effect of canning and freezing on the nutritional content of apricots. *Journal of Food Science*, 83(6), 1757–1761. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14157>
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., & Hiremath, N. (2005). The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and colour of mango pulp. *International Journal of Food Science and Technology*, 40(8), 885–895. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01026.x>
- Amit, S. K., Uddin, M. M., Rahman, R., Islam, S. M. R., & Khan, M. S. (2017). A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. *Agriculture & Food Security*, 6(51). <https://doi.org/10.1186/s40066-017-0130-8>
- Avila-Gaxiola, E., Delgado-Vargas, F., Zazueta-Niebla, J., López-Angulo, G., Vega-García, M., & Caro-Corrales, J. (2016). Variable retort temperature profiles for canned papaya puree. *Journal of Food Process Engineering*, 39(1), 11–18. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12194>
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (4.ª ed.). Pearson Educación.
- Bouzari, A., Holstege, D., & Barrett, D. M. (2015). Vitamin retention in eight fruits and vegetables: A comparison of refrigerated and frozen storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(3), 957–962. <https://doi.org/10.1021/jf5058793>
- Canuto, G. A. B., Xavier, A. A. O., Neves, L. C., & Benassi, M. de T. (2010). Caracterização físico-química de polpas de frutos da Amazônia e sua correlação com a atividade anti-radical livre. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(4), 1196–1205. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452010005000122>
- Cole, M. B., Augustin, M. A., Robertson, M. J., & Manners, J. M. (2018). The science of food security. *npj Science of Food*, 2(14). <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0021-9>
- Costa, M. P., Frasao, B. S., Silva, A. C. O., Freitas, M. Q., Franco, R. M., & Conte-Junior, C. A. (2015). Cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) pulp, probiotic, and prebiotic: Influence on color, apparent viscosity, and texture of goat milk yogurts. *Journal of Dairy Science*, 98(9), 5995–6003. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9738>
- Das Neves Selis, N., De Oliveira, H. B. M., Dos Anjos, Y. B., Leão, H. F., Sampaio, B. A., Correia, T. M. L., Reis, M. M., Brito, T. L. S., Almeida, C. F., Pena, L. S. C., Brito, L. F., Ornelas, R. M., Santos, T. T., Campos, G. B., Timenetsky, J., Cruz, M. P., Da Costa, A. M., Yatsuda, R., Uetanabaro, A. P. T., & Marques, L. M. (2021). *Gardnerella vaginalis* and *Neisseria gonorrhoeae* are effectively inhibited by lactobacilli with probiotic properties isolated from Brazilian cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) Fruit. *BioMed Research International*, 2021, 1–15, artículo 6626249. <https://doi.org/10.1155/2021/6626249>
- De Oliveira, P. D., Da Silva, D. A., Pires, W. P., Bezerra, C. V., Da Silva, L. H. M., & Da Cruz Rodrigues, A. M. (2021). Enzymatic interesterification effect on the physicochemical and technological properties of cupuassu seed fat and inaja pulp oil blends. *Food Research International*, 145, artículo 110384. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110384>
- Emelike, N. J. T., & Ebere, O. C. (2015). Effect of packaging materials, storage conditions on the vitamin C and pH value of cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) juice. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 3(4), 160–165. <https://doi.org/10.11648/j.jfns.20150304.14>

- Ghoshal, G. (2018). Emerging Food Processing Technologies. En *Food Processing for Increased Quality and Consumption* (pp. 29–65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811447-6.00002-3>
- Gondim, T. M. de S., Thomazini, M. J., Cavalcante, M. de J. B., & Souza, J. M. L. (2001). *Aspectos da produção de cupuaçu*. Documento 67. Embrapa Acre. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/498481/1/doc67.pdf>
- Hurtado, P. (1987). *Procesos tecnológicos de conservación de frutas y hortalizas y su almacenamiento*. Cartagena, Colombia.
- Maciel, R. M. G., Lima, S. B., Costa, J. M. C., & Afonso, M. R. A. (2020). Influência da maltodextrina nas propriedades de escoamento do pó da polpa de cupuaçu. *Brazilian Journal of Development*, 6(2), 5829–5839. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-039>
- Maeda, E. E., & Mussa, D. M. D. N. (1986). The stability of vitamin C (L-ascorbic acid) in bottled and canned orange juice. *Food Chemistry*, 22(1), 51–58. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(86\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0308-8146(86)90008-7)
- McGinnis, M. J., Gustashaw, K. A. R., & Painter, J. E. (2020). Fruit myth or fact. *Nutrition Today*, 55(6), 322–327. <https://doi.org/10.1097/NT.0000000000000447>
- NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01 (2008) *Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de la calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano*. Resolución Ministerial N° 591-2008/MINSA, 27 de agosto. <https://bit.ly/3ub9mig>
- Ordóñez-Santos, L. E., & Vázquez-Riascos, A. (2010). Effect of processing and storage time on the vitamin C and lycopene contents of nectar of pink guava (*Psidium guajava* L.). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 60(3). <https://www.alanrevista.org/ediciones/2010/3/art-10/>
- Peña Valdeiglesia, J., & Alegre Orihuela, J. C. (2017). Tipificación de prototipos de sistemas de producción agroforestal en la provincia de Tambopata, Madre de Dios. *Aporte Santiaguino*, 10(2), 233–244. <https://doi.org/10.32911/as.2017.v10.n2.166>
- Pereira, Ana L. F., Abreu, V. K. G., & Rodrigues, S. (2018). Cupuassu—*Theobroma grandiflorum*. *Exotic Fruits*, 159–162. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803138-4.00021-6>
- Pereira, Ana Lúcia Fernandes, Feitosa, W. S. C., Abreu, V. K. G., Lemos, T. de O., Gomes, W. F., Narain, N., & Rodrigues, S. (2017). Impact of fermentation conditions on the quality and sensory properties of a probiotic cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) beverage. *Food Research International*, 100(part 1), 603–611. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.055>
- Pokorny, J. (2005). *Antioxidantes de los alimentos: Aplicaciones prácticas*. Acribia.
- Pugliese, A. G., Tomas-Barberan, F. A., Truchado, P., & Genovese, M. I. (2013). Flavonoids, Proanthocyanidins, vitamin C, and antioxidant activity of *Theobroma grandiflorum* (cupuassu) pulp and seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(11), 2720–2728. <https://doi.org/10.1021/jf304349u>
- Ramos, S., Salazar, M., Nascimento, L., Carazzolle, M., Pereira, G., Delforno, T., Nascimento, M., De Aleluia, T., Celeghini, R., & Efraim, P. (2020). Influence of pulp on the microbial diversity during cupuassu fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 318, artículo 108465. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108465>
- Salgado, J. M., Rodrigues, B. S., Donado-Pestana, C. M., Dos Santos Dias, C. T., & Morzelle, M. C. (2011). Cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) peel as potential source of dietary fiber and phytochemicals in whole-bread preparations. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(4), 384–390. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0254-0>
- Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. H. (2003). *Ingeniería de alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. Limusa.
- Silva, A. G. M., Lima, S. C. G., De Oliveira, P. D., Moraes, M. Dos S., Guimarães, C. M. C., Silva, J. A. R., Garcia, A. R., Nahúm, B. de S., Neres, L. de S., Noronha, G. N., & Lourenço Júnior, J. de B. (2021). Production, chemical composition, and fatty acid profile of milk from buffaloes fed with cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) cake and murumuru (*Astrocaryum murumuru*) cake in the Eastern Amazon. *Animal Science Journal*, 92(1), artículo e13576. <https://doi.org/10.1111/asj.13576>
- Stumbo, R. (1973). *Thermobacteriology in food processing* (2.ª ed.). Academic Press.

- Tenea, G. N., & Ortega, C. (2021). Genome characterization of *Lactiplantibacillus plantarum* strain UTNGt2 originated from *Theobroma grandiflorum* (white cacao) of Ecuadorian Amazon: Antimicrobial peptides from safety to potential applications. *Antibiotics*, *10*(4), 383. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10040383>
- Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E., & Mohana Roopan, S. (2018). Importance of food science and technology-way to future. En S. M. Roopan & G. Madhumitha (Eds.), *Bioorganic phase in natural food: An overview* (pp. 11–23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74210-6_2
- Valencia Sullca, C. E., & Guevara Pérez, A. (2013). Variación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos durante el procesamiento del néctar de zarzamora (*Rubus fruticosus* L.). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *79*(2). <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v79n2/a04v79n2.pdf>
- Vieira, M. C., Teixeira, A. A., & Silva, C. L. M. (2000). Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. *Journal of Food Engineering*, *43*(1), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00121-1)
- Vieira, M. C., Teixeira, A. A., & Silva, C. L. M. (2001). Kinetic parameters estimation for ascorbic acid degradation in fruit nectar using the Partial Equivalent Isothermal Exposures (PEIE) Method under non-isothermal continuous heating conditions. *Biotechnology Progress*, *17*(1), 175–181. <https://doi.org/10.1021/bp000132w>
- Vriesmann, L. C., & De Oliveira Petkowicz, C. L. (2009). Polysaccharides from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*): Structural characterization of a pectic fraction. *Carbohydrate Polymers*, *77*(1), 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.12.007>

Revisión de la literatura sobre logística inversa, sus aplicaciones y tendencias futuras

(Literature Review of Reverse Logistic, applications and future trends)

Jorge Campoverde¹, Martha Elena Carrillo², Jonnathan Jiménez Yumbra³, Raúl Roldán Nariño⁴,
Diego Loyola⁵ y Katherine Coronel-Pangol⁶

Resumen

En el artículo se presenta una revisión de la literatura sobre investigaciones, casos de aplicación y exploración de logística inversa (LI). Para ello, se utilizaron varias bases de datos para la recuperación de los artículos. La revisión ha permitido analizar los conceptos iniciales de la LI y complementarlos con nuevas ópticas y argumentos desarrollados por varios autores. El principal aporte es la taxonomía propuesta en el desarrollo del artículo, conformada por la relación de temas y términos encontrados en la revisión literaria. Se han identificado los campos de aplicación más importantes y las tendencias futuras en materia de LI, en donde se ha determinado que es necesario ampliar el análisis de la LI hacia una perspectiva económica, social, cultural y ambiental.

Palabras clave

Logística inversa, taxonomía, cadena cerrada

Abstract

This article presents a review of the literature on Reverse Logistics (RL) research, application cases and exploration. Various databases were used to retrieve articles. This review has allowed to analyze initial concepts of RL and complementary ones with new optics and arguments developed by various authors. The main contribution is the taxonomy proposed in the development of the article. It was made up of relationship of themes and terms found in the literary review. Also, the most important fields of application and future trends in RL have been identified, where it has been determined that it is necessary to extend the analysis of RL towards an economic, social, cultural and environmental perspective.

Keywords

Reverse logistic, taxonomy, closed loop chain.

1 Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. [jorge.campoverde@ucuenca.edu.ec]
2 Pontificia Universidad Javeriana de Colombia, Bogotá, Colombia. [mcarrill@javeriana.edu.co]
3 Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. [jonnathan.jimenez@ucuenca.edu.ec]
4 Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. Bogotá, Colombia. [rroldan@javeriana.edu.co]
5 Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. [diego.loyola@ucuenca.edu.ec]
6 Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. [katherine.coronelp95@ucuenca.edu.ec]

1. Introducción

Una de las primeras definiciones de LI fue la presentada ante el Council of Logistic Management por J. Stock (1992), quien la definió como

... el término utilizado a menudo para referirse al papel de la logística en el reciclaje, la eliminación de residuos y la gestión de materiales peligrosos; una perspectiva más amplia incluye todo lo relacionado con las actividades logísticas llevadas a cabo en la reducción de fuentes, reciclaje, sustitución, reutilización de materiales y eliminación.

Carter y Ellram (1998) realizaron uno de los primeros trabajos académicos en el campo de la LI. En su estudio recogen las primeras aproximaciones a los conceptos de LI. La LI no debe ser considerada simplemente como un proceso de recuperación de materiales o productos, sino que se la debe incorporar en un proceso de reducción de materiales desde su fabricación, de manera tal que los insumos que se utilicen en el proceso de producción también se reduzcan y fluyan en menor cantidad hacia atrás.

La Reverse Logistic y Sustainability Organization (2007) definió a la LI como “el proceso de mover bienes de su destino final típico a otro punto, con el propósito de capturar valor que de otra manera no estaría disponible, para la disposición apropiada de los productos”. En su estudio, De Brito y Dekker (2014) indican que a la LI o reversa se la conocía con otros nombres, tales como: logística de retorno, logística retro o distribución reversa, sin embargo, la discrepancia de términos ha sido una de las causas por las que no ha existido un consenso sobre el alcance y la definición de la LI. Por esta razón, no se debe confundir la LI con la gestión de residuos. La gestión de residuos hace referencia únicamente a la recolección y eliminación de residuos, es decir, productos para los que no es factible un nuevo uso, mientras que la LI contempla fases de reutilización, reprocesamiento y reciclaje. Van Engeland et al. (2018) explican que en la literatura científica coexisten dos grandes áreas: eliminación atractiva y la gestión de los residuos. La LI no es simétricamente opuesta a la logística directa. La diferencia entre LI y logística directa puede interpretarse mediante varios atributos como la cantidad, categoría, tiempo de ciclo, unidad de mantenimiento de inventario y rutas de distribución. Los productos devueltos suelen ser pequeños en cantidad y tienen muchos tipos diferentes.

Stock (1992) dice que la LI requiere inversión y que los costos varían entre el 4 % y el 9.49 % del total de los costos logísticos de la empresa. En el caso del sector del *retail*, los costos de aplicar LI oscilan entre el 5 % y 6 %. Para Mihi-Ramírez et al. (2012), la LI debe ser considerada como una oportunidad de inversión para las empresas y no como un gasto, pues la empresa debe perseguir el incremento de sus beneficios, aumentar el valor de la marca, anticiparse a la demanda y mejorar la detección de necesidades de los clientes. De esta manera, explica Srivastava (2008), se consigue un mayor porcentaje de retención y atracción de la clientela. De Brito y Dekker (2014) indican que las principales razones para hacer LI son beneficios económicos, disposiciones legales y presiones de los clientes asociada a la creciente cultura ciudadana respecto a la recuperación de residuos y productos. Asimismo, Mar y Gracia (2015) consideran que los beneficios de la LI se clasifican en dos grupos: beneficios por la recuperación de productos y beneficios por la recuperación de envases. Mihi-Ramírez et al. (2012) indica que las causas por las cuales en las empresas españolas es necesario iniciar un proceso de LI son las siguientes: producto dañado o no deseado (25.38 %), errores en pedidos o insatisfacción del cliente (20.63 %), fin de la vida útil del producto (20.10 %), exceso de inventario (11.7 %), acuerdos contractuales (8.13 %), fin de promoción (6.14 %), ajustes de inventario (4.92 %) y reciclaje (3 %).

Desde 1992, cuando Stock propuso uno de los primeros conceptos, se han desarrollado un sinnúmero de trabajos en el marco de la LI, desde diferentes ópticas y de manera técnica, a través del desarrollo de modelos matemáticos que han pretendido dar soluciones de optimización en el campo ambiental analizando el impacto que tienen los desechos y proponiendo opciones de recuperación de materiales; y desde el campo social como una forma de posicionamiento de marca de las empresas, entre otros.

En general, el impacto y las aristas que ha generado y está generando la LI son amplias. En este sentido, los aspectos en los que los autores se han enfocado son los siguientes: diseño de la cadena y ruteo (Li et al., 2017; Ranjbaran et al., 2019; Govindan et al., 2020; Mahmoudi & Parviziomran, 2020), optimización a través de modelos matemáticos (Zarbakhshnia et al., 2020), planificación (Govindan et al., 2020), economía circular (Donner et al., 2020; Julianelli et al., 2020; Zarbakhshnia et al., 2020), entre otros. Cabe recalcar que la mayor parte de producción científica está disponible en inglés, y los estudios se los ha desarrollado en países europeos o asiáticos. Se ha encontrado muy poca evidencia científica de procesos de LI que se hayan llevado o se están llevando a cabo en América Latina. Por ejemplo, algunos trabajos desarrollados en Colombia, Venezuela, Brasil, Cuba y Argentina corresponden a las primeras aproximaciones que se han hecho en materia de LI.

A pesar de los amplios estudios, existe una falta de convergencia de conceptos sobre la LI y su aplicación, por lo que el objetivo propuesto para este artículo es analizar la literatura existente para identificar la taxonomía de dichos conceptos en función de los cuales se pueda determinar las tendencias y futuras líneas de investigación en esta temática. También se plantea un acápite con un análisis centrado en Latinoamérica, aspecto que generalmente no se considera en los análisis revisados.

2. Metodología

El análisis literario se ha hecho a partir de la revisión de 2 457 artículos académicos indexados en Web of Science, Scopus, Latindex y Scielo, lo que ha permitido constatar que los autores convergen en algunos términos comunes. Se ha considerado una temporalidad de 10 años, es decir, desde el 2010 hasta el 2020. La ecuación de búsqueda ha sido *reverse logistic* o 'logística inversa' utilizada tanto en los títulos como en las palabras clave. A partir de las palabras clave, se ha construido la taxonomía, la cual permite identificar claramente los conceptos y orientar las líneas de investigación. Para construir la taxonomía, se ha basado en la literatura y en estudios previos en los que se ha identificado tres grandes áreas de análisis con respecto a la LI.

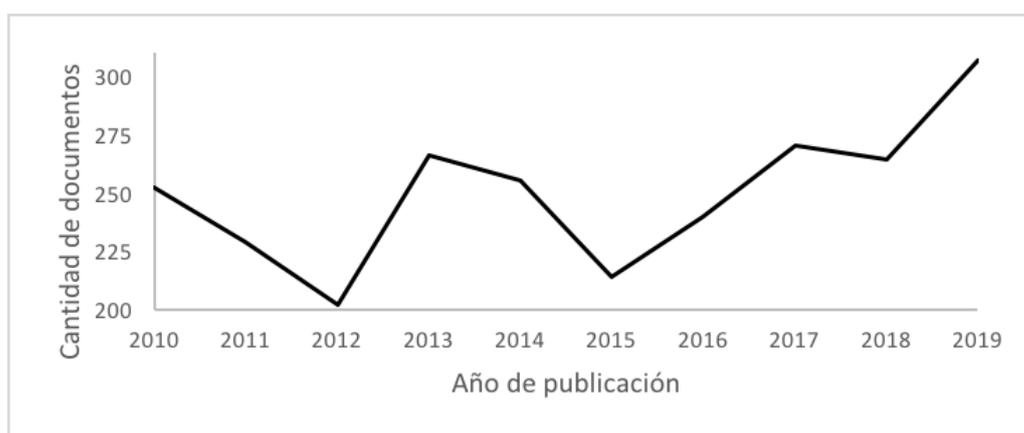
Con el fin de encontrar los temas que los investigadores han mencionado en sus escritos científicos al tratar la LI, se revisaron 9 030 palabras claves (solo proporcionadas por el autor) de 2 457 artículos, de las cuales se han tomado las más representativas, así como su evolución. Por último, se analiza detalladamente la producción en América del Sur considerando la misma metodología planteada.

3. Resultados

La ecuación de búsqueda *reverse logistic* o 'logística inversa' para documentos en una ventana de tiempo desde 2010 hasta 2020 y con un alcance geográfico de todo el mundo muestra un crecimiento sostenido del número de artículos a partir del año 2015 (Figura 1). Esta tendencia

de crecimiento es posible explicarla con un incremento en la percepción que el tema ha tomado día a día, porque se ha incrementado la relevancia en el mundo ante la concienciación ambiental creciente. Aunque a principios de la década parece notarse que decrecía el interés en el tema, a medida que transcurre el tiempo de análisis, se descubre una clara tendencia de aumento.

Figura 1. Cantidad de documentos publicados por año



En los últimos diez años, algunos autores han hecho valiosas contribuciones al tema de LI. Como se puede apreciar en la tabla 1, se detalla el autor y el número de trabajos relacionados con la LI, de manera que se puede ver, por ejemplo, que Kannan Govindan es uno de los autores que mayor aporte ha desarrollado, algunos de manera individual, mientras que otros los ha desarrollado junto con otros investigadores.

Tabla 1. Autores y número de contribuciones en LI en los últimos 10 años

Autor	Documentos	Autor	Documentos
Govindan Kannan	32	Wang Y.	13
Li Y.	18	Jha P.C.	13
Zhang Y.	16	Agrawal Saurabh	12
Zhang G.	15	Shankar R.	12
S. H.	13	Sarkis J.	11
Singh R.K.	13	Hazen B.T.	11
Diabat A.	13	Wang X.	11
Jaber M.Y.	13	Chileshe N.	11
Li X.	13	Rameezdeen R.	11

La mayoría de los trabajos de estos autores han sido revisados y son pilares fundamentales en el desarrollo de este trabajo, entre estos se destacan Kazemi et al. (2019), quienes hicieron una revisión bibliométrica de los artículos publicados en la revista *International Journal of Production of Research*⁷ sobre la LI. Govindan, Agarwal, et al. (2019) analizaron las empresas tecnológicas indias en las cuales se propone una red de cadena de suministro integrada para

7 Una de las principales revistas en difundir investigaciones relacionadas con este tema.

la evaluación y la selección de socios directos y de proveedores externos de la cadena de la LI, para lo cual se utiliza un proceso de jerarquía analítica difusa, con una programación de enteros mixtos de dos objetivos, para maximizar el beneficio del fabricante y el puntaje sostenible de los proveedores. Govindan et al. (2016) desarrollaron un modelo en el que se considera integralmente aspectos ambientales, sociales y económicos, así como los indicadores. Este modelo fue desarrollado a través de optimización multiobjetivo, multiperiodo y multienfoque para construir una red de logística sostenible. Reddy et al. (2020) plantean un modelo de programación lineal de enteros mixtos para resolver una red de LI verde de varios periodos y varios niveles incluyendo la selección del tipo de vehículo. En general se puede apreciar el carácter técnico de estos trabajos, además de su aplicación en países asiáticos y europeos, pero también la falta de trabajos relacionados con la LI en América, especialmente América del Sur.

Se han resumido las palabras claves utilizadas por los autores (tabla 2), incluyendo los autores que los mencionan, lo cual ha permitido construir un concepto propio que se presenta a continuación:

Logística inversa es la cadena cerrada que abarca el proceso o conjunto de estrategias a través de las cuales los flujos retornan al inicio, produciendo la devolución de productos o materiales, que posteriormente se reciclan, reutilizan, reparan, remanufacturan, recolectan o renuevan, con el objetivo de recuperar valor, contribuir con el medio ambiente. Este procedimiento constituye una ventaja competitiva en la gestión empresarial, al conseguir eficiencia y optimización de costos, equipos y rutas, lo cual se logra aplicando modelos matemáticos, con el enfoque de redes de suministro verdes y el diseño de redes de LI.

Tabla 2. Palabras más mencionadas y autores

Palabra Clave	Autores
<i>Remanufacturing</i>	(Alamerew & Brissaud, 2020; Reddy et al., 2020)
<i>Sustainability</i>	(Agrawal et al., 2016b; Govindan et al., 2016; Mangla et al., 2016; Govindan, Agarwal, et al., 2019; Govindan, Kadziński, et al., 2019; Liu et al., 2019; Zarbakhshnia et al., 2020; Julianelli et al., 2020)
<i>Supply chain management (SCM)</i>	(Agrawal et al., 2016a; Govindan et al., 2017; Van Engeland et al., 2018; Kazemi et al., 2019)
<i>Recycling</i>	(Silva Rodríguez, 2017; Liu et al., 2019; Aydin, 2020; Guarnieri et al., 2020; Karagoz et al., 2020; Wang et al., 2020)
<i>Closed-loop supply chain (SC)</i>	(Amin & Baki, 2017; Misni & Lee, 2017; Amin, et al., 2017; Heydari et al., 2017; Kazemi et al., 2019; Govindan et al., 2020)
<i>Reverse logistic</i>	(Agrawal et al., 2016c; Mangla et al., 2016; Heydari et al., 2017; Amin et al., 2017; Govindan & Bouzon, 2018; Tosarkani & Amin, 2018; Van Engeland et al., 2018; Agrawal & Singh, 2019; Govindan, Jha, et al., 2019; Herrera-Granda et al., 2019; Kazemi et al., 2019; Guarnieri et al., 2020; Mahmoudi & Parviziomran, 2020; Reddy et al., 2020; Wang et al., 2020)
<i>Supply chain</i>	(Batarfi et al., 2017; Heydari et al., 2017; Kazemi et al., 2019)
<i>Waste management</i>	(Van Engeland et al., 2018; Agrawal & Singh, 2019; Donner et al., 2020; Karagoz et al., 2020; Mukherjee et al., 2020; Rossit et al., 2020)
<i>Network design</i>	(Govindan et al., 2017; Banguera et al., 2018; Ranjbaran et al., 2019; Aydin, 2020; Govindan et al., 2020; Reddy et al., 2020)

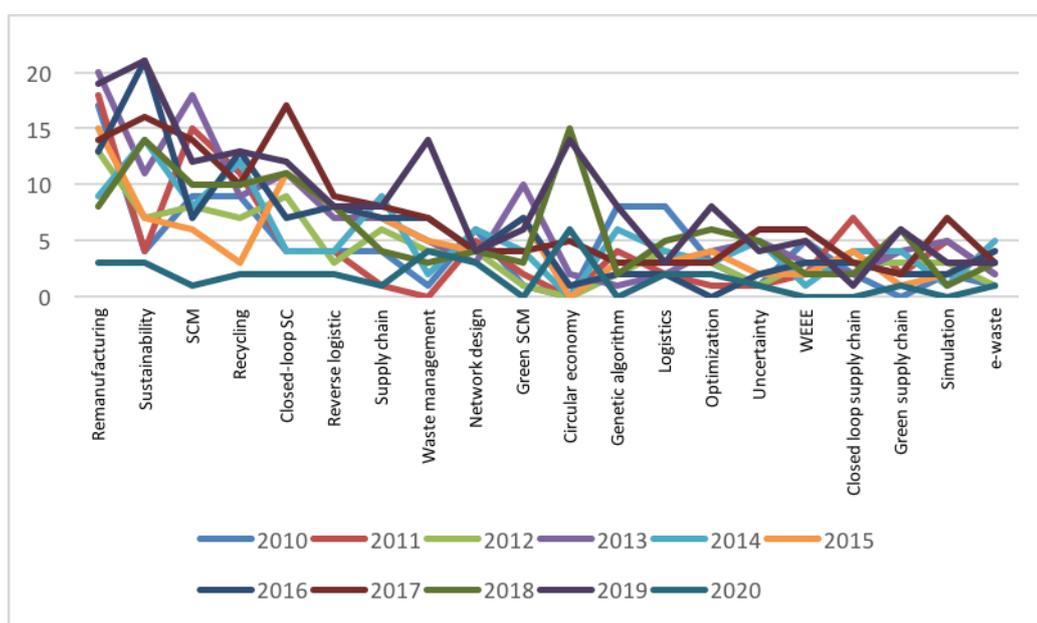
<i>Green supply chain management</i>	(Saffar et al., 2015; Misni & Lee, 2017; Rabbani et al., 2017)
<i>Circular economy</i>	(Banguera et al., 2018; Agrawal & Singh, 2019; Alamerew & Brissaud, 2020; Donner et al., 2020; Govindan et al., 2020; Guarnieri et al., 2020; Jin et al., 2020; Julianelli et al., 2020)
<i>Genetic algorithm</i>	(Govindan et al., 2017; Tosarkani & Amin, 2018; Govindan, Kadziński, et al., 2019; Rossit et al., 2020; Trochu et al., 2020)
<i>Logistics</i>	(Agrawal et al., 2016a; Ranjbaran et al., 2019)
<i>Optimization</i>	(Govindan, Paam et al., 2016; Tosarkani & Amin, 2018; Herrera-Granda et al., 2019; Trochu et al., 2020; Zorbakhshnia et al., 2020; Aydin, 2020)
<i>Uncertain</i>	(Ranjbaran et al., 2019; Zorbakhshnia et al., 2020; Aydin, 2020; Rossit et al., 2020)
<i>waste of electrical y electronic equipment (WEEE)</i>	(Agrawal, et al. 2016c; Govindan, Agarwal, et al., 2019; Rodrigues et al., 2020)
<i>Closed loop supply chain</i>	(Agrawal et al., 2016c; Fattahi & Govindan, 2017; Julianelli et al., 2020)
<i>Green supply chain</i>	(Saffar et al., 2015; Misni & Lee, 2017; Rabbani et al., 2017)
<i>Simulation</i>	(Fattahi & Govindan, 2017; Alamerew & Brissaud, 2020; Rossit et al., 2020; Trochu et al., 2020)
<i>e-waste</i>	(Donner et al., 2020; Mukherjee et al., 2020; Rodrigues et al., 2020; Trochu et al., 2020)

La LI es considerada por muchos autores como una cadena cerrada de suministro, es decir, es el proceso que complementa la logística directa y cierra los ciclos o bucles del proceso logístico. Otro de los aspectos importantes es el de la cadena verde de suministro, porque normalmente se relaciona la LI con el medio ambiente. En varios trabajos sobre la LI se muestra la aplicación e implementación de modelos matemáticos, de manera que se pretende dar soluciones ya sea por medio de procedimientos estocásticos o no estocásticos, lógicos o difusos a problemas propios de la LI. En este sentido, se desarrollan diseño de redes de logística, diseño de rutas, optimización y simulación, entre otros. Todos estos aspectos han permitido construir la taxonomía que se desarrolla en el siguiente apartado.

3.1. Taxonomía de la LI

Luego de revisar las 9 030 palabras claves, se han tomado las más representativas (tabla 2) que se puede ver en la figura 2, en donde se indica el número de veces que la palabra ha sido utilizada y la evolución por año. Al revisar estas 20 palabras claves sin ningún tipo de agrupamiento, es posible ver cómo las 11 primeras presentan unas frecuencias de uso relativamente más altas que el resto, donde resaltan principalmente un grupo relacionado con las tendencias de procesamiento como remanufactura, reciclado y manejo de desechos. Otro grupo de términos que muestra una importancia en su frecuencia de uso reúne tendencias en las estrategias empresariales en cuanto al manejo de la LI como sostenibilidad, cadenas de ciclo cerrado, diseño de redes, logística verde o economía circular.

Figura 2. Relación de palabras claves por año



En estos dos grupos hay incrementos particulares en palabras como remanufactura, SCM, ciclo o cadena cerrada, gestión de desechos y economía circular, y se puede constatar las tendencias particulares en determinados años por las cuales los investigadores se inclinan para acercarse a un tema específico. A continuación, en la tabla 3, se detallan las frecuencias y porcentajes de la figura 2, lo que permite concluir una estrecha relación entre remanufactura y LI, pues de todas las palabras es la de mayor uso. También resaltan sostenibilidad y SCM.

Tabla 3. Palabras claves por año de publicación

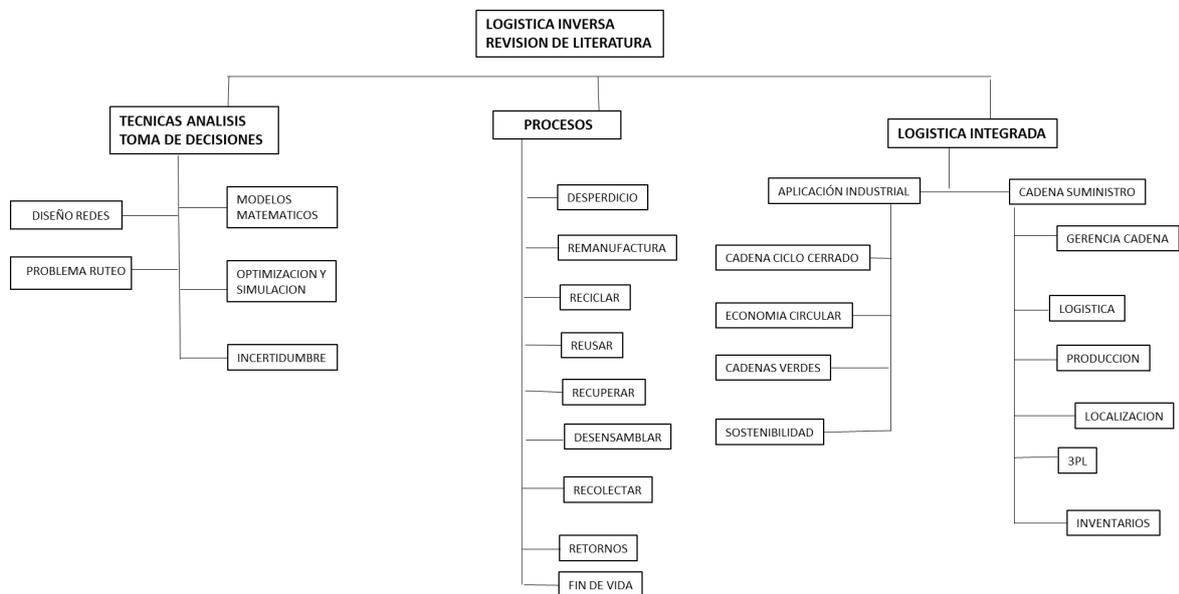
Palabra clave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total	%
Remanufacturing	17	18	13	20	9	15	13	14	8	19	23	149	12.57 %
Sustainability	4	4	7	11	14	7	21	16	14	21	23	122	10.30 %
Supply chain management	9	15	8	18	8	6	7	14	10	12	11	108	9.11 %
Recycling	9	11	7	9	12	3	13	10	10	13	23	99	8.35 %
Closed-loop supply chain	4	4	9	11	4	11	7	17	11	12	22	92	7.76 %
Reverse logistic	4	4	3	7	4	8	8	9	8	8	12	65	5.49 %
Supply chain	4	1	6	7	9	7	7	8	4	8	11	62	5.23 %
Waste management	1	0	4	5	2	5	7	7	3	14	24	52	4.39 %
Network design	6	5	4	3	6	4	4	4	4	4	13	47	3.97 %
Green supply chain management	1	2	1	10	4	7	7	4	3	6	10	45	3.80 %
Circular economy	0	0	0	2	0	0	1	5	15	14	16	43	3.63 %
Genetic algorithm	8	4	2	1	6	3	2	3	2	8	10	39	3.29 %
Logistics	8	2	4	2	4	3	2	3	5	3	12	38	3.21 %
Optimization	3	1	3	4	3	4	0	3	6	8	12	37	3.12 %

<i>Uncertainty</i>	1	1	1	5	5	2	2	6	5	4	11	33	2.78 %
<i>waste of electronic equipment</i>	5	2	3	3	1	2	3	6	2	5	10	32	2.70 %
<i>Closed loop supply chain</i>	2	7	3	2	4	4	3	3	2	1	10	31	2.62 %
<i>Green supply chain</i>	0	2	3	4	4	1	2	2	6	6	11	31	2.62 %
<i>Simulation</i>	2	5	3	5	1	2	2	7	1	3	10	31	2.62 %
<i>e-waste</i>	1	2	1	2	5	4	4	3	3	3	11	29	2.45 %
Total	89	90	85	131	105	98	115	144	122	172	285	1.427	
%	6.23 %	6.31 %	5.96 %	9.18 %	7.36 %	6.87 %	8.06 %	10.09 %	8.54 %	12.05 %	19.97 %		

Las palabras claves analizadas (tabla 2 y figura 2) han servido como insumo para construir la taxonomía (clasificación de temáticas de LI) que permitió organizar y orientar este estudio. Esta clasificación surge de un procesamiento de las palabras para eliminar errores de la base de datos como comas, espacio, comillas y agrupar términos que se referían a una misma categoría. Empezando por el título, se agruparon los conceptos LI y revisión de literatura. En un segundo nivel de análisis se construyeron tres subgrupos, dependientes conceptualmente del tema revisión de literatura de LI.

1. Subgrupo técnicas de análisis: formado por 6 palabras clave.
2. Subgrupo procesos: fue creado por los autores para reunir una serie de 9 palabras.
3. Subgrupo logística integrada: formado por 13 palabras claves incluyendo el título del subgrupo (figura 3).

Figura 3. Taxonomía de la LI



El primer subgrupo (técnicas de análisis) agrupa herramientas principalmente de tipo analítico matemático que aportan en la exploración de los posibles modelos analíticos usados

en este tema. Entre ellos encontramos conceptos como modelos matemáticos, optimización y simulación, incertidumbre y problema de ruteo que son típicos estudios de esta categoría.

El segundo subgrupo, denominado procesos, incluye básicamente todas las categorías de formas de procesamiento que se pueden hacer en el momento de ejecutar logística en reversa. Adicionalmente incluye las palabras como desperdicio, retornos y fin de vida, propias de este análisis, que constituyen formas de describir algunos de los resultados obtenidos en la circulación de productos.

El tercer subgrupo, denominado logística integrada, involucra a su vez dos aspectos: aplicación industrial y cadena de suministro. El primero de ellos incluye una serie de aspectos relacionados con estrategias que son posibles asumir para diseñar cadenas de suministro ya sean directas o inversas. El segundo implica una serie de conceptos muy relacionados con la logística tradicional como localización, 3PL o inventarios, que también son necesarios para la LI.

3.2. Aplicaciones de la LI en América Latina

Para analizar la aplicación de la LI en América Latina, se ha realizado una búsqueda de “aplicación de logística inversa América Latina” y “reverse logistic application Latin America” en Google Scholar, donde se encontraron 530 documentos, los cuales han sido revisados y resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. Estudios por país

País de América	Documentos	Porcentaje	Autores
Brasil	239	76.85 %	(Gutberlet et al., 2017; Bouzon et al., 2018; Abuabara et al., 2019; Voigt et al., 2019; De Oliveira et al., 2019; Rodrigues et al., 2020; De Oliveira & Borges, 2020; Guarnieri et al., 2020; Peña-Montoya et al., 2020)
Colombia	23	7.40 %	(Peña-Montoya et al., 2015; Silva Rodríguez, 2017; De La Hoz et al., 2017; Gómez Montoya et al., 2017; Oyola & Amaya-Mier, 2019, marzo 5-7)
México	22	7.07 %	(Cruz-Netro et al., 2016; Pérez-Salazar et al., 2017; Uriarte-Miranda et al., 2018; Piyathanavong et al., 2019)
Chile	8	2.57 %	(Johnson et al., 2015; Sepúlveda-Rojas & Benitez-Fuentes, 2016, mayo 10-14; Soto et al., 2016; Banguera et al., 2018; Lagos et al., 2018)
Argentina	5	1.61 %	(Noé, 2015; Dondo & Méndez, 2016; Gutberlet et al., 2017; Rossit et al., 2020)
Ecuador	4	1.29 %	(Sepúlveda & Banguera, 2017; Banguera et al., 2018; Herrera-Granda et al., 2019; López et al., 2019, julio 24-26)
Venezuela	2	0.64 %	(Bustos, 2015; García-Rodríguez et al., 2013)
Perú	1	0.32 %	(Rusel & Tello, 2019)
Uruguay	1	0.32 %	(Rossit et al., 2020)

Se puede apreciar que Brasil es el país que lidera estudios en este tema con el 77 % aproximadamente de los artículos publicados. Entre los estudios llevados a cabo en Brasil, Rodrigues

et al. (2020) analizaron el flujo doméstico de los desechos electrónicos en Sao Paulo e indican que es complejo, debido a su generación difusa y la dependencia del comportamiento del consumidor. El objetivo del estudio pretendió apoyar desde la academia las políticas públicas relacionadas. Bouzon et al. (2018) evaluaron la interrelación entre las barreras logísticas inversas desde la perspectiva de las partes interesadas en el contexto brasileño, y determinaron que en el entorno brasileño existen aproximadamente 10 de 13 barreras que impiden la implementación adecuada de la LI.

En Colombia, Silva Rodríguez (2017) destaca la importancia de la LI en la recolección y acopio de desechos. Silva Rodríguez desarrolló un estudio con el objetivo de resolver el problema generado por la no devolución y recolección de envases de plaguicidas en el distrito de riego de Usochicamocha (Departamento de Boyacá, Colombia), para lo cual diseñó una red de LI, la cual contempla fases como recolección, acopio y disposición final de los residuos y recipientes de plaguicidas. De La Hoz et al. (2017) elaboró un modelo de programación lineal para la LI del sector de plástico polipropileno en una empresa de la zona industrial de Cartagena dedicada al proceso y comercialización de plásticos reciclados, en la cual realizaron un análisis para optimizar los factores relevantes que influyen a lo largo de la LI de toda la cadena del proceso asociado con la recuperación del plástico.

En 2015, en Córdoba (Argentina) se estudiaron 6 empresas a través de un enfoque cualitativo. Se pudo conocer que las empresas que habían incorporado en su planificación estratégica aspectos formales de LI, principalmente relacionados con el marco de acciones de sustentabilidad o responsabilidad social, obtenían un desempeño superior relacionado con principios no sólo económicos, sino también sociales y ambientales. Además, aquellas empresas que lo hicieron lograron ventajas competitivas con respecto a las que no lo hicieron (Noé, 2015). En Bahía Blanca (Argentina) y en Montevideo (Uruguay), Rossit et al. (2020) llevaron a cabo una aplicación experimental en escenarios reales de un problema de multioptimización que tuvo como objetivo optimizar la accesibilidad al sistema, la cantidad de residuos recolectados y el costo de instalación del manejo de desechos. Estos criterios fueron considerados como primordiales al momento de resolver el problema de ubicación de las papeleras en la zona urbana de estas ciudades.

En Ecuador, López et al. (2019, julio 24–26) evaluaron la gestión de almacenamiento de un almacén de bienes de consumo que tenía problemas como demasiado tiempo para realizar operaciones o una gran movilización de personas y productos. Los autores presentaron una propuesta de mejora para reducir los tiempos y costos de preparación de los pedidos a través de la aplicación de un modelo de programación de enteros binarios. Herrera-Granda et al. (2019) realizaron la optimización de la red de contenedores de residuos sólidos urbanos de Ibarra a través de un modelo de programación multiobjetivo de enteros mixtos.

En Chile Banguera et al. (2018) desarrollaron un modelo de programación lineal de enteros mixtos para ubicar instalaciones capacitadas, las cuales cumplen con los objetivos de reciclaje y minimizan el costo de las multas en caso de inviabilidad. De esta manera se calculan los flujos óptimos, la configuración de las instalaciones de recolección, reprocesamiento y reciclaje, así como la estimación de la cantidad de dinero necesario para la operación factible del negocio.

3.3. Tendencias para el futuro

Las tendencias futuras en general versarán sobre la aplicación conjunta de métodos aplicados en otras áreas creando enfoques híbridos que permitan obtener soluciones más reales y de aplicación práctica para los problemas de la LI, los cuales deben extenderse a varios campos, en

los cuáles sea factible implementar procesos de LI; por esta razón, en el 2020, se han publicado algunos artículos que se acoplan con estos nuevos enfoques. Un ejemplo es el trabajo de Zarkhshnia et al. (2020), quienes proponen un nuevo enfoque híbrido de toma de decisiones con atributos múltiples, influenciado por un proceso de jerarquía analítica difusa y la optimización de objetivos múltiples.

De la misma manera, Govindan et al. (2020) desarrollaron un enfoque híbrido de proceso de red de análisis difuso, laboratorios de prueba y evaluación de toma de decisiones difuso y modelos de programación lineal entera mixta para la selección circular de proveedores y la asignación de pedidos en una cadena de suministro circuito cerrado, uno de los problemas más habituales en LI. Una de las principales conclusiones planteadas por los autores determina que la aplicación del modelo propuesto es rentable y respetuoso con el medio ambiente. Así también, Aydin (2020) desarrolló un modelo matemático estocástico basado en escenarios y el diseño de la red de LI para mejorar la gestión de escombros, considerando la composición de los terrenos.

Otro aspecto que se marca como tendencia de estudio para el futuro corresponde a la economía circular y el compromiso de recuperación de los productos como estrategia para recuperar valor. Jin et al. (2020) analizaron el restablecimiento de valor a través de la recuperación de unidades de disco duro y determinaron que la mejor manera de contribuir al medio ambiente es reutilizando dichas unidades y, como segunda alternativa, se debería aplicar un proceso de recuperación del conjunto de imanes o de imán a imán. Los autores sugieren para investigaciones futuras realizar una optimización cuyo objetivo sea minimizar la huella ambiental. En este sentido, Donner et al. (2020) presentaron su trabajo en el cual estudian desechos agrícolas y la valoración de subproductos, y proponen seis maneras diferentes de manejar los desechos, a través de una nueva jerarquización de las actividades de LI.

Estos enfoques muestran una nueva tendencia con enfoque en el desarrollo sostenible. Por medio de la utilización de varias herramientas, se puede constatar que las diferentes alternativas para generar una recuperación de los productos y residuos marcan las pautas para obtener beneficios multilaterales dirigidos a empresas, clientes, personas, comunidades, medio ambiente, gobierno, entre otros grupos de interés. Las tendencias como la economía circular, la LI pura, el reciclaje, la recuperación y tratamiento de residuos, entre otros, deben ser analizadas desde el punto de vista económico y social para determinar los beneficios reales que generan para todos los involucrados.

4. Conclusiones

Una de las primeras conclusiones después la revisión de la literatura está relacionada con el ámbito de aplicación de los estudios desarrollados. Los modelos matemáticos para la optimización y diseño de la cadena de suministro inversa son los temas que más llaman la atención de los investigadores, porque son los métodos que mayor exactitud brindan para crear soluciones con miras a resolver problemas de empresas y productos que por su naturaleza necesitan ser devueltos a su lugar de origen. En este sentido, según se explica en la sección de tendencias al futuro, es necesario plantear estudios que contemplen en sus modelos matemáticos y de acción, variables de carácter económico, ambiental y social, es decir, considerar todos estos componentes para evaluar de mejor manera el impacto y las repercusiones que puede tener realizar o no la LI.

Este trabajo sirvió para analizar el campo de aplicación de la LI y se constató que la mayoría de los análisis fueron hechos en Estados Unidos, Europa o países asiáticos, mientras que en América Latina no existe el suficiente sustento científico ni experimentación de campo que brinde resultados concluyentes. Existen primeras aproximaciones llevadas a cabo en Brasil, Colombia, Venezuela, Argentina y Cuba enfocadas en el diseño de rutas para cadenas de LI, sin embargo, sigue siendo un ámbito que aún requiere de estudio y experimentación profunda, dado que la aplicación a nivel regional continúa siendo empírica, sin crear conciencia empresarial y ciudadana sobre la importancia de hacer actividades de LI. Deberían establecerse políticas públicas que tengan como objetivo fomentar el desarrollo económico y social de los pueblos y comunidades a través de actividades como los procesos de LI.

Es importante recalcar que la LI, en su sentido más integral, se refiere al flujo de retorno, no exclusivamente al de productos, sino a todos los suministros que se emplean en la logística directa, lo que incluye información, conocimiento y productos. Además, la LI no es exactamente proporcional ni en tiempo ni en recursos a la logística directa; es decir que los suministros utilizados en la logística directa retornarán en menos del 50 % a su lugar de origen; además, la cadena de LI implica muchos más eslabones que la cadena de logística directa, lo que implica la participación de más actores y costos adicionales que deben ser considerados. Adicionalmente, no existen métodos técnicos establecidos para manejar y gestionar los flujos de la LI, de manera que los inventarios, cantidades por ordenar, recibir, entre otros, son manejadas por experiencia de los involucrados sin ser necesariamente los óptimos.

Entre las principales motivaciones de la LI se encuentran la responsabilidad medioambiental y la legislación verde que obliga a las empresas a responsabilizarse de sus productos, incluso una vez terminada su vida útil; no obstante, la LI también es una estrategia comercial para recuperar los productos que por alguna condición no satisfacen al cliente, incluso si están en condiciones óptimas y pueden ser distribuidos de nuevo. Asimismo, los productos que han terminado su vida útil y son recuperados por el productor, pueden contener información interesante para él como modo de uso del producto, tiempo de vida real del producto, condiciones en las cuales se manejan los productos, entre otra información que puede ser utilizada para mejorar las condiciones del producto o las recomendaciones de uso.

Finalmente, se puede indicar de manera general que los temas pendientes por investigar y aportar al conocimiento científico se relacionan con costos ambientales, LI para productos perecederos, valuación de inventarios y cantidades óptimas de productos que deben ser recuperados y su tratamiento; modelos de optimización, procesos de LI y gestión de calidad; tecnología de la información en el éxito de los procesos de LI, entre otros relacionados. No obstante, es necesario ampliar la investigación y aplicación de la LI en América Latina, pues la literatura existente es muy sucinta, lo que impide el establecimiento de un marco de referencia regional sobre la LI.

Agradecimiento

Este artículo se deriva del Proyecto DIUC "Análisis de la logística inversa y su impacto, aplicado al sector de comercialización de neumáticos, en la provincia del Azuay". Este proyecto fue apoyado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), en el marco de la XVI Convocatoria DIUC para Proyectos de Investigación al I Concurso Universitario de Proyectos de

Investigación de Asignación Horaria Exclusiva, el cual contó con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana de Colombia.

Referencias

- Abuabara, L., Paucar-Caceres, A., & Burrowes-Cromwell, T. (2019). Consumers values and behaviour in the Brazilian coffee-in-capsules market: Promoting circular economy. *International Journal of Production Research*, 57(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1629664>
- Agrawal, S., & Singh, R. (2019) Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, artículo 104448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104448>
- Agrawal, S., Singh, R., & Murtaza, Q. (2016a). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.045>
- Agrawal, S., Singh, R., & Murtaza, Q. (2016b). Outsourcing decisions in reverse logistics: Sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach. *Resources, Conservation & Recycling*, 108, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.004>
- Agrawal, S., Singh, R., & Murtaza, Q. (2016c). Prioritizing critical success factors for reverse logistics implementation using fuzzy-TOPSIS methodology. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(1), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s40092-015-0124-8>
- Alamerew, Y., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254, artículo 120025, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>
- Amin, S., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Amin, S., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 73(Issue C), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024>
- Aydin, N. (2020). Designing reverse logistics network of end-of-life-buildings as preparedness to disasters under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 256, artículo 120241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120341>
- Banguera, L., Sepúlveda, J., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*, 205I, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
- Batarfi, R., Jaber, M., & Aljazzar, S. (2017). A profit maximization for a reverse logistics dual-channel supply chain with a return policy. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 58–82. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.024>
- Bouzon, M., Govindan, K., & Rodriguez, C. (2018). Evaluating barriers for reverse logistics implementation under a multiple stakeholders' perspective analysis using grey decision making approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 315–335. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.022>
- Bustos F. C. (2015). La logística inversa como fuente de producción sostenible. *Actualidad Contable Facces*, 18(30), 7–32. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25739666002>
- Carter, C., & Ellram, L. (1998). Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistic*, 19(1), 85–102. <https://bit.ly/3o94SEN>
- Cruz-Netro, Z., Medina, J., Cartas, A., y Garza, R. (2016). Solid waste management in Mexico's offshore platform construction: Determining potential supply for a reverse logistics process. *NETNOMICS*:

- Economic Research and Electronic Networking*, 17(1), 71–94. <https://doi.org/10.1007/s11066-016-9105-3>
- De Brito, M., & Dekker, R. (2014). A framework for reverse logistics. En Dekker R., Fleischmann M., Inderfurth K., Van Wassenhove L.N. (Eds.), *Research in Management* (pp. 3–27). https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1
- De la Hoz, E., Vélez, J., & López, L. (2017). Modelo de programación lineal multiobjetivo para la logística inversa en el sector plástico de polipropileno. *Información Tecnológica* 28(5), 31–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000500005>
- De Oliveira, C., Luna, M., & Campos, L. (2019). Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.319>
- De Oliveira, T., & Borges, A. (2020). The development role of customers in the reverse logistics of industrial waste. En *Business, Trade and Institutional Sustainability* (245–254). https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_57
- Dondo, R., & Méndez, C. A. (2016). Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks. *Computers and Chemical Engineering*, 88(C), 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.017>
- Donner, M., Gohier, R., & Vries, H. (2020). A new circular business model typology for creating value from agro-waste. *Science of the Total Environment*, 716, artículo 137065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137065>
- Fattahi, M., & Govindan, K. (2017). Integrated forward/reverse logistics network design under uncertainty with pricing for collection of used products. *Annals of Operations Research* 253(1), 193–225. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2347-5>
- García-Rodríguez, F., Castilla-Gutiérrez, C., & Bustos-Flores, C. (2013). Implementation of reverse logistics as a sustainable tool for raw material purchasing in developing countries: The case of Venezuela. *International Journal Production Economics*, 141(2), 582–592. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.09.015>
- Gómez Montoya, R., Correa Espinal, A., & Vásquez Herrera, L. (2017). Logística inversa: Un enfoque con responsabilidad social empresarial. *Criterio Libre*, 10(16), 144–158. <https://doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.16.1167>
- Govindan, K., Agarwal, V., Dhingra, J., & Jha, P. (2019). An integrated decision making model for the selection of sustainable forward and reverse logistic providers. *Annals of Operations Research*, 273(1–2), 607–650. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2654-5>
- Govindan, K., & Bouzon, M. (2018). From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 187, 318–337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.040>
- Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>
- Govindan, K., Jha, P., Agarwal, V., & Dhingra, J. (2019). Environmental management partner selection for reverse supply chain collaboration: A sustainable approach. *Journal of Environmental Management*, 236, 784–797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.088>
- Govindan, K., Kadziński, M., Ehling, R., & Miebs, G. (2019). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE I and SMAA. *Omega*, 85, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.007>
- Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Mohammad, S. (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317>

- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>
- Guarnieri, P., Cerqueira-Streit, J., & Batista, L. (2020). Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. *Resources, Conservation & Recycling*, 153, 104541. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104541>
- Gutberlet, J., Carengo, S., Kain, J., & Martiniano, A. (2017). Waste picker organizations and their contribution to the circular economy: Two case studies from a Global South perspective. 6(4), 52, *MDPI Resources*. <https://doi.org/10.3390/resources6040052>
- Herrera-Granda, W. G., Imbaquingo-Usiña, W., Lorente-Leyva, L., Herrera-Granda, E., Peluffo-Ordoñez, D., Rossit, D. (2019). Optimization of the network of urban solid waste containers: A case study. En Botto-Tobar M., Pizarro G., Zúñiga-Prieto M., D'Armas M., Zúñiga Sánchez M. (Eds), *Technology Trends, CITT: Vol 895* (pp. 91–103). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05532-5_44
- Heydari, J., Govindan, K., & Jafari, A. (2017). Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52(part A), 379–398. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.008>
- Jin, H., Frost, K., Sousa, I., Ghaderi, H., Bevan, A., Zakotnik, M., & Handwerker, C. (2020). Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, artículo 104781. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104781>
- Johnson, F., Vega, J., Cabera, G., & Cabrera, E. (2015). Ant colony system for a problem in reverse logistic. *Studies in Informatics and Control*, 24(2), 133–140. <https://doi.org/10.24846/v24i2y201501>
- Julianelli, V., Caiado, R., Scavarda, L., & Pinto, S. (2020). Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, artículo 104784. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104784>
- Karagoz, S., Aydin, N., & Simic, V. (2020). End-of-life vehicle management: A comprehensive review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(2), 416–442. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00945-y>
- Kazemi, N., Modak, N., & Govindan, K. (2019). A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: A bibliometric and content analysis. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4937–4960. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471244>
- Lagos, C., Guerrero, G., Cabrera, E., Moltedo, A., Johnson, F., & Paredes, F. (2018). An improved particle swarm optimization algorithm for the VRP with simultaneous pickup and delivery and time windows. *IEEE Latin America Transactions*, 16(6), 1732–1740. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8444393>
- Li, J., Wang, J., Pan, Q., Duan, P., Sang, H., Gao, K., & Xue, Y. (2017). A hybrid artificial bee colony for optimizing a reverse logistics network system. *Soft Computing. Springer Berlin Heidelberg*, 21(20), 6001–6018. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2539-1>
- Liu, W., Wan, Z., Wan, Z., & Bing, G. (2019). Sustainable recycle network of heterogeneous pharmaceuticals with governmental subsidies and service-levels of third-party logistics by bi-level programming approach. *Journal of Cleaner Production*, 249, artículo 119324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119324>
- López, J., Freile, Á., & Iglesias, S. (2019, julio 24–26). Reduction in picking times orders for delivery in a national distribution center: A case study. 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities” Montego Bay, Jamaica. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.366>
- Mahmoudi, M., & Parviziomran, I. (2020). Reusable packaging in supply chains: A review of environmental and economic impacts, logistics system designs, and operations management. *International Journal of Production Economics*, 228(3), artículo 107730. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107730>

- Mangla, S., Govindan, K., & Luthra, S. (2016). Critical success factors for reverse logistics in Indian industries: A structural model. *Journal of Cleaner Production*, 129, 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.124>
- Mar, J., & Gracia, M. (2015). Logística inversa: Prácticas actuales, tendencias futuras y oportunidades de investigación. *Revista QUID: Investigación, Ciencia y Tecnología*, 23(2014), 31–40. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5235933>
- Miñi-Ramírez, A., Arias-Aranda, D., & García-Morales, V. (2012). La gestión de la logística inversa en las empresas españolas: Hacia las prácticas de excelencia. *Universia Business Review*, 33, 70–82. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43323186004>
- Misni, F., & Lee, L. S. (2017). A Review on strategic, tactical and operational decision planning in reverse logistics of green supply chain network design. *Journal of Computer and Communications*, 5(8), 83–104. <https://doi.org/10.4236/jcc.2017.58007>
- Mukherjee, C., Denney, J., Mbonimpa, E., Slagley, J., & Bhowmik, R. (2020). A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, artículo 109512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>
- Noé, C. (2015). Relación entre logística inversa y desempeño: Estudio de casos en Córdoba, Argentina. *Cuadernos de Administración*, 31(53), 85–96. <https://bit.ly/3rcgHMm>
- Oyola, J., & Amaya-Mier, R. (2019, marzo 5–7). A reverse logistics network optimization model for residual OTR tires from the mining industry: A Colombian case study [Proceedings]. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bangkok, Tailandia. <https://bit.ly/3g9NRpL>
- Peña-Montoya, C., Osorio-Gómez, J., Vidal-Holguin, C., Torres-Lozada, P., & Marmolejo-Rebellon, L. (2015). Reverse logistics in the plastics subsector: Main facilitators and barriers. *Ingeniería e Investigación*, 35(3), 27–33. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n3.49834>
- Peña-Montoya, C., Bouzon, M., Torres-Lozada, P., & Vidal-Holguin, J. (2020). Assessment of maturity of reverse logistics as a strategy to sustainable solid waste management. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 38(1), 65–76. <https://doi.org/10.1177/0734242x19897131>
- Pérez-Salazar, M., Aguilar, A., Cedillo-Campos, M., & Hernández, J. (2017). The role of knowledge management in supply chain management: A literature review. *Journal of Industrial Engineering Management*, 10(4), 711–788. <https://doi.org/10.3926/jiem.2144>
- Piyathanavong, V., Garza-Reyes, J., Kumar, V., Maldonado-Guzman, G., y Mangla, S. (2019). The adoption of operational environmental sustainability approaches in the Thai manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 220, 507–528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.093>
- Rabbani, M., Saravi, N., & Farrokhi-Asl, H. (2017). Design of a forward/reverse logistics with environmental considerations. *International Journals of Supply and Operations Management*, 4(2), 129–146. <https://doi.org/10.22034/2017.2.02>
- Ranjbaran, F., Kashan, A., & Kazemi, A. (2019). Mathematical formulation and heuristic algorithms for optimisation of auto-part milk-run logistics network considering forward and reverse flow of pallets. *International Journal of Production Research*, 58(2), 1–35. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1617449>
- Reddy, K., Kummar, A., Sarkis, J., & Kumar, M. (2020). Effect of carbon tax on reverse logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106184. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106184>
- Reverse Logistic and Sustainability Organization. (2007). RLSC: About RLSC.
- Rodrigues, A., Boscov, M., & Günther, W. (2020). Domestic flow of e-waste in São Paulo, Brazil: Characterization to support public policies. *Waste Management*, 102(1), 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.052>

- Rossit, D., Toutouh, J., & Nesmachnow, S. (2020). Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios. *Waste Management*, 105, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.016>
- Rusel, C., & Tello, B. (2019). Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC). En K. Arai, R. Bhatia y S. Kapoor (Eds.), *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)* (Vol. 2, pp, 305–323). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02683-7>
- Saffar, M., Shakouri, H., & Razmi, J. (2015). A new multi objective optimization model for designing a green supply chain network under uncertainty. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(1), 15–32. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2014.10.001>
- Sepúlveda-Rojas, J., & Benitez-Fuentes, P. (2016, mayo 10–14). Coordination and return uncertainties in closed loop supply chains. *6th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, 188–195, Oradea, Rumania. <https://doi.org/10.1109/ICCCC.2016.7496759>
- Sepúlveda, J., & Banguera, L. (2017). A model for design of a reverse logistics network under extended producer responsibility. *24th International Conference on Production Research, ICPR*.
- Silva Rodríguez, J. (2017). Diseño de una red de logística inversa: Caso de estudio Usochicamocha-Boyacá. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 91–113. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.4>
- Soto, J., Muñoz, J., & Giesen, R. (2016). How many urban recycling centers do we need and where ? A continuum approximation approach. *Transportation Research Procedia*, 12, 851–860. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.038>
- Srivastava, S. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega: The International Journal of Management Science*, 36(4), 2007–2009. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>
- Stock, J. (1992). *Reverse logistics in the supply chain*. Council of Logistics Management.
- Tosarkani, B., & Amin, S. (2018). A multi-objective model to configure an electronic reverse logistics network and third party selection. *Journal of Cleaner Production*, 198, 662–682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.056>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2020). A carbon-constrained stochastic model for eco-efficient reverse logistics network design under environmental regulations in the CRD industry. *Journal of Cleaner Production*, 245, artículo 118818. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118818>
- Uriarte-Miranda, M., Caballero-Morales, S., Martínez-Flores, J., Cano-Olivos, P., & Akulova, A. (2018). Reverse logistic strategy for the management of tire waste in Mexico and Russia: Review and conceptual model. *MDPI Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su10103398>
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2018). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>
- Voigt, D., Casarotto, N., Atherino, M., Guerra, T., & Garbin da Rocha, R. (2019). Performance evaluation of reverse logistics: Opportunities for future research. *Sustainability*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195291>
- Wang, J., Li, H., Lu, H., Yang, H., & Wang, C. (2020). Integrating offline logistics and online system to recycle e-bicycle battery in China. *Journal of Cleaner Production*, 247, artículo 119095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119095>
- Zarbakhshnia, N., Wu, Y., Govindan, K., y Soleimani, H. (2020). A novel hybrid multiple attribute decision-making approach for outsourcing sustainable reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118461>

Modelación y simulación computacional de fluido del *Piptocoma discolor* (pigüe) para la optimización de la combustión en el Ecuador

(Modeling and computational simulation of *Piptocoma discolor* (Pigüe) fluid for combustion optimization in Ecuador)

Juan Elías González¹, Deny Oliva M.², David Zambrano Vera³, Rubén Darío Ledesma⁴, Mario Jorge Bonilla⁵, Erika Clara Casco G.⁶, Édison Ernesto Zúñiga⁷

Resumen

La modelación y simulación computacional representan una herramienta competitiva y funcional que apoya eficazmente al estudio del comportamiento termoquímico en la optimización de la combustión. Garantiza resultados confiables a través de la modelación y diseño, y permitió la validación de las propiedades termodinámicas en exceso aplicados para la combustión de la biomasa del *Piptocoma discolor* (pigüe) de la región amazónica del Ecuador y América Latina. Los parámetros del modelo fueron físicos, químicos y térmicos a través de los fluidos dinámicos computacionales en optimización de la combustión. Se obtuvo el modelo matemático de la combustión bajo el método de transporte de la especie. En la simulación se consideró las variables del flujo de aire primario, contenido de humedad. Las variables de los parámetros de la combustión fueron N₂, O₂, CO, H, presión, temperatura, humedad, energía total y tiempo de quemado de las partículas de biomasa. La configuración geométrica fue desarrollada según los principios fundamentales de CFD dentro de Ansys Fluent para obtener el comportamiento de la velocidad, turbulencia, presión, etc. de la composición del combustible óptimo 91.75 % de una combustión completa y frente a otras especies que arrojan el 86 % de las reacciones de la combustión de las especies.

Palabras clave

Piptocoma discolor, modelación, simulación, optimización, combustión

Abstract

Computational modeling and simulation represents a competitive and functional tool that effectively supports the study of thermochemical behavior in combustion optimization, guaranteeing reliable results through modeling, design and allowed the validation of excess thermodynamic properties applied for combustion. of the biomass of *Piptocoma discolor* (pigüe) from the Amazonian region of Ecuador and Latin America. The model parameters were physical, chemical and thermal through computational fluid dynamics in combustion optimization. And the mathematical model of combustion was obtained under the transport method of the species. In the simulation, the variables of primary air flow and moisture content were observed. The variable of the combustion parameters were N₂, O₂, CO, H, pressure, temperature, humidity, total energy and burning time of the biomass particles. The geometric configuration was developed according to the fundamental principles of CFD within Ansys Fluent to obtain the behavior of speed, turbulence, pressure, etc. of the composition of the optimal fuel 91.75% of a complete combustion and compared to other species that show 86% of the reactions of the combustion of the species.

Keywords

Piptocoma discolor, modeling, simulation, optimization, combustion

- 1 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [jgonzalez@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-0674-7741]
- 2 Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana, Cuba. [deny@ceter.cujae.edu.cu, https://orcid.org/0000-0001-8117-3605]
- 3 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [dzambrano@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-2121-0205]
- 4 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [rledesma@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-2086-0185]
- 5 Consultor ambiental, registro MAE-SUIA-0249-CI. Pastaza, Ecuador. [oncejorge1@yahoo.es, https://orcid.org/0000-0002-1328-5602]
- 6 Corporación de Desarrollo Integral Rashellbella (CORDEIR). Bolívar, Ecuador. [claracasco369@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6603-6837]
- 7 Unidad Educativa Intercultural Bilingüe Canelos. Pastaza, Ecuador. [ezunigalopez12@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0605-7978]

Introducción

El desarrollo de los sistemas CAD avanzado ha permitido desarrollar los campos de aplicación de la dinámica de los fluidos computacionales (CFD). Este método constituye una de las ramas de la ingeniería mecánica que utiliza los métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos computacionales (Cruz et al., 2020). Ansys Fluent, dentro de su plataforma, reúne diferentes sistemas para física, mecánica de los sólidos, dinámica de los fluidos, electromagnetismos, parte nodal para análisis vibratorios, entre otros módulos importantes de análisis. Actualmente este *software* es una de las plataformas más desarrolladas en el mundo que arrojan resultados óptimos, porque utiliza entornos en tercera dimensión, lo cual permite visualizar los fenómenos físicos en su totalidad (Ansys, 2010). La dinámica de fluidos computacionales ha sido empleada a nivel nacional e internacional en una gran cantidad de campos de la ingeniería, por ser la ciencia en la simulación de flujo de fluido, transferencia de calor y fenómenos similares a estos, según diversas investigaciones relacionadas con CFD. Este análisis refuerza el conocimiento de los subprocesos subyacentes, lo que permite una mayor investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, así como optimizar los sistemas existentes.

Sin embargo, la fiabilidad de los resultados obtenidos depende de la exactitud de la física, la química y de los modelos numéricos adoptados, así como de las condiciones de contorno considerado altamente confiable en la modelación y simulación computacional del lecho fluido (que puede ser difícil de obtener debido a inestabilidades en el "lecho de combustible sólidos"), la alimentación irregular de combustible, las fluctuaciones de presiones externas que afectan a la alimentación del aire, la formación de depósitos, la heterogeneidad de combustible, etc. (Ansys, 2013a). Es indispensable modificar la matriz energética renovable del Ecuador incrementando la participación de esta energía que representa actualmente un 6 % (biomasa), para evitar las graves consecuencias medioambientales que ocasiona el uso exagerado de los combustibles fósiles y los efectos negativos de su explotación en la biodiversidad de los ecosistemas de la naturaleza (Yndurain, 2005). La Amazonía, por su cuenca hidrográfica del río Amazonas, constituye la mayor formación boscosa del mundo, y por su biodiversidad se considera la más rica en recursos genéticos. A partir de varios aportes se ha logrado conocer una parte de los potenciales energéticos en la provincia de Pastaza y la transición origina un incentivo al desarrollo de nuevas tecnologías energéticas sostenibles (Castro, 2011). Según consta en los estudios botánicos de las especies que pueblan la región amazónica, el bosque primario corresponde al 53.81 % del total y de bosque secundario un 46.19 % (Hetsch, 2004). La especie de interés como potencial de biomasa por su crecimiento rápido conocida como *Piptocomoca discolor* (J. E. González et al., 2018).

El estudio profundo del pigüe, como biomasa energética, por sus potenciales características físicas, químicas y térmicas, y por sus propiedades como combustible, ha permitido describir su comportamiento bajo un régimen de altas temperaturas, para el desempeño bajo las condiciones de una combustión completa, entre otros aspectos importantes (Zuñiga, 2018). Con base en el conocimiento establecido se pretende realizar el aprovechamiento completo del pigüe a escala industrial y su participación en la generación de energía como fuente renovable con todas las ventajas y bondades que brinda el uso de la biomasa como combustible (González et al., 2020). Por lo tanto, los resultados numéricos deben ser cuidadosamente evaluados y deben llevarse a cabo extensas validaciones experimentales. Junto con las mediciones experimentales, el modelado CFD es una herramienta eficiente de gran alcance en la investigación y el desarrollo

de dispositivos de combustión, por esta razón, se ha ganado importancia en la investigación y desarrollo de hornos y calderas, en particular calderas de pequeña escala (Ansys, 2013^a).

Uno de sus principales productos de simulación es el *software* Ansys Fluent de dinámica de fluidos computacional CFD-FLUENT. Este *software* es un código general multipropósito basado en el método de volumen y elemento finitos aplicado a una malla. La tecnología de FLUENT posee una paquetería completa para simulación, a partir de un módulo de dibujo en 3D, modelos matemáticos y esquemas de solución; un módulo para crear cualquier tipo de malla y un paquete de posprocesamiento (Ansys, 2010). Con el objetivo de evaluar, mediante la dinámica de fluidos computacionales, la influencia de diferentes parámetros de diseño y operación en la eficiencia de la combustión de *Piptocoma discolor* (pigüe) como combustible biomásico renovable para la Amazonía ecuatoriana.

Metodología

Área de estudio

El estudio se desarrolló en los cuatro cantones de la provincia de Pastaza tal como se detalla a continuación.

Arajuno, Mera, Santa Clara y Pastaza cuentan con una altitud de 550 a 960 m.s.n.m. medida con apoyo de un instrumento para la medición cartográfica GPS, con una humedad relativa entre 80 y 90 % y una temperatura promedio de 22°C (Quezada, 2013). Esta información permitió seleccionar las zonas de interés del bosque secundario para extraer las muestras y especies (González et al., 2020; Murillo, 2004), con base en la metodología publicada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2014) además de aplicar el muestreo sistemático de parcelas y árboles para extraer las muestras por cantones (Camacho & Murillo, 2018).

Método de muestreo

El estudio experimental se hizo previa categorización de acuerdo con el diámetro altura pecho (DAP) de la especie del *Piptocoma discolor* (pigüe) de la siguiente manera: en la primera 10–15 cm, en la segunda 16–21 cm, en la tercera 22–27 cm y en la cuarta 28–33 cm; 12 árboles por cantón, lo que da un subtotal de 48 árboles de los 600 árboles estudiados con características morfológicas semejantes para extraer la muestra de biomasa según la norma (TAPPI, 203m 58 se utilizó para la cuantificación de la cantidad de alfa celulosa obtenida del 2018). Mediante instrumentos especializados se obtuvo el peso de 3 kg por troza y 36 Kg/cantón. De los cuatro cantones se obtuvo 144 kg de muestras para la determinación según la fórmula de Fernández-Puratich & Oliver-Villanueva (2014).

Astillado

El astillado fue de un espesor de 2 cm² y largo de 2 cm², 5 cm² y 8 cm² (Solar, 2013) y para la combustión la astilla contiene una humedad del 45 % (Gobierno de Navarra, 2015). Se procedió al proceso de secado en un horno industrial American Range, a una temperatura automatizada con ±5°C. Asimismo, se utilizaron las normas COPANT-maderas 458 para las muestras y determinación del porcentaje de humedad y otros análisis físicos.

Estructura química

Para la determinación de la composición química fue importante realizar la molienda para reducir el tamaño de la partícula según las recomendaciones de Solar (2013), la norma internacional UNE-EN-15149-2 (2011) y Castelló et al. (2017). La clasificación de la partícula del biocombustibles sólidos se hizo en 8 tamices, con luz de malla, 3000 μm , 850 μm , 425 μm , 300 μm , 212 μm , 180 μm , 150 μm , 75 μm y pulverizado en esta experimentación tal como manifiesta (Nogues et al., 2010). Al ser pesados y valorados el tamaño de partícula según la cantidad retenida en cada uno de los tamices de acuerdo a luz de malla para determinar los usos industriales como pellets, según (Rezaei et al., 2016) los porcentajes obtenidos.

Tabla 1. Datos termoquímicos para simulación en el *software* Ansys Fluent

Análisis elemental	(% peso en seco)
Carbono	46.03
Hidrógeno	4.33
Nitrógeno	0.02
Oxígeno	30.58
Análisis proximal	(% peso en seco)
Material volátil	73.04
Carbono fijo	14.39
Cenizas	0.57
Humedad	12
Composición química	(% peso en seco)
Celulosa	42.25
Hemicelulosa	22.03
Lignina	22.95
Otros compuestos orgánicos	12.77
Análisis calorimétrico	(MJ/kg)
Poder calorífico	18-19

Fuente: (González et al., 2019).

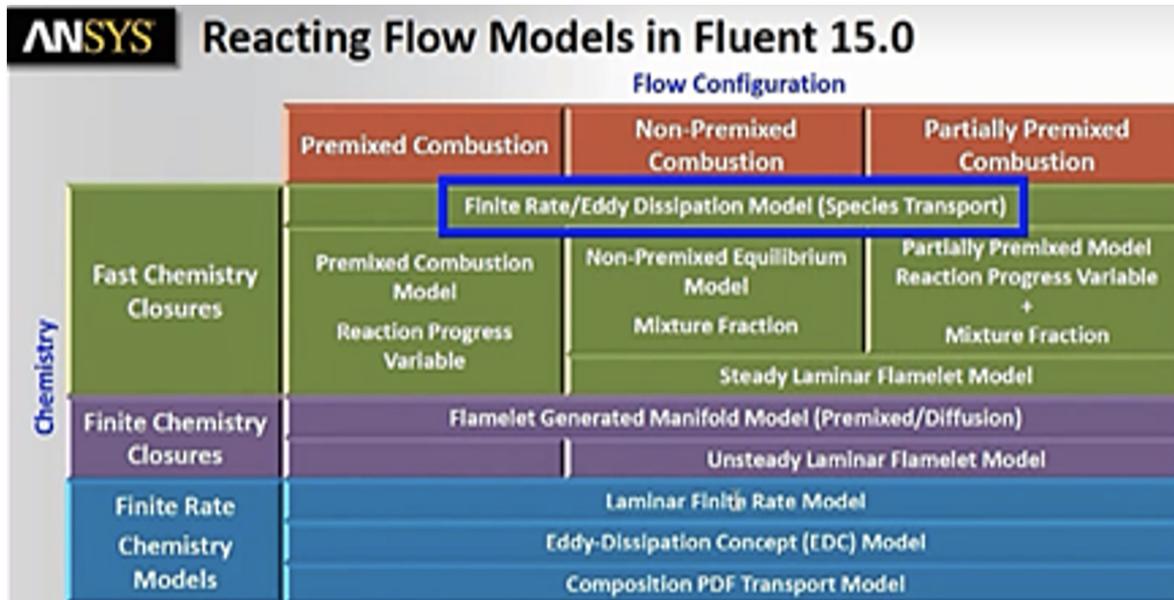
Experimentación con *software* Ansys Fluent para la combustión

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Se realizó un análisis profundo basado en las expresiones cinéticas, de balances de masa, energía y cantidad de movimiento, de gases y sólidos, en estado estacionario y con todos los elementos térmicos y químicos. Se puede desarrollar varios modelos matemáticos de acuerdo con lo que el usuario desea analizar dentro del campo de la combustión. En este caso particular,

el método de transporte de especies figura como el más adecuado para este análisis (Ansys, 2010) debido a que considera modelos matemáticos de la combustión.

Figura 1. Métodos y modelos matemáticos para sistemas de análisis de combustión (Zuñiga, E, 2018)



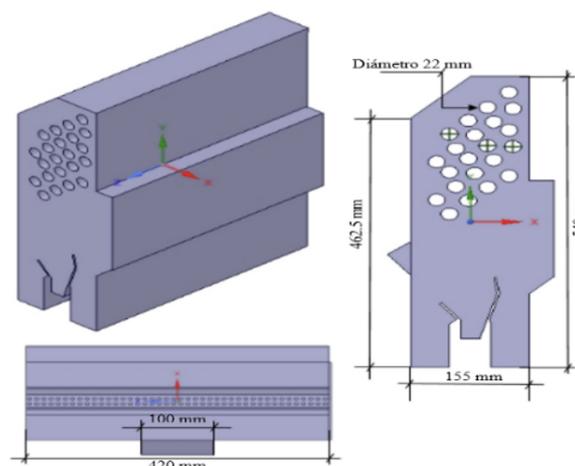
La figura 1 muestra las tres etapas que fueron desarrolladas en el Ansys Fluent mediante la tasa finita/dispersión de remolinos (transporte de especies) con las variables de progreso de la reacción del modelo de combustión premezclada, fracción de mezcla del modelo de equilibrio no premezclado y fracción de mezcla variable de progreso de reacción de modelo parcialmente premezclado permitió obtener los modelos matemáticos de la combustión.

VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

Se ha considerado en este trabajo el flujo de aire primario y el contenido de humedad de *Piptocoma discolor*, como también fueron necesarios los reaccionantes, calor específico, diámetros promedios de los pellets y temperatura inicial en el horno. Las variables de respuesta fueron los siguientes parámetros o componentes de la combustión: cantidad de N_2 , O_2 , CO_2 , CO , H , presión, temperatura, humedad, energía total y tiempo de quemado de las partículas de biomasa. El flujo de aire primario se presenta en cantidades menores en la parte baja del horno de análisis en un total de 84 orificios por donde ingresará aire y a su vez caerá la biomasa en forma de cenizas. Así también, las compuertas de abastecimiento de biomasa como de mantenimiento se convierten en un ingreso adicional de aire primario (Porteiro et al., 2009).

Este trabajo se desarrolló en una caldera de pellets cuyas medidas y configuración geométrica se presenta en la figura 2, lo cual no será motivo de análisis en esta investigación, así como los principios fundamentales de CFD, puesto que están bien documentados respectivamente. Se presenta una simulación completa de una caldera de pellets, que se basa en un código CFD disponible en el mercado, y el modelo de cama, que se basa en un reactor agitado perfecto sustentado internacionalmente (Porteiro et al., 2009).

Figura 2. Isometría del volumen interno de la caldera empleada en este trabajo



MODELO MATEMÁTICO

Las dinámicas de fluidos computacionales ocupan ecuaciones que representan un proceso de equilibrio para las especies de masa, cantidad de movimiento, energía y productos químicos. Se debe tener muy en cuenta la física de la partícula en las diferentes cantidades en las ecuaciones de balance (Ansys, 2013^a).

Para este estudio se consideró el modelo matemático basado en el transporte de especies, en estudio de una especie particular amazónica, la cual con una previa caracterización facilita la configuración de la simulación pretendida.

TRANSPORTE DE ESPECIES Y REACCIÓN

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho Y_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right] + R_i + S_i \quad (1)$$

Donde:

Y_i = Fracción de masa de especies químicas

u_i = Velocidad

R_i = Fuente de reacción

S_i = Todas las demás fuentes

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \rho) = 0 \quad (2)$$

CONSERVACIÓN DE MASA

$$-\frac{u}{t} + \frac{(v)}{x} + \frac{(w)}{y} + \frac{(z)}{z} = 0 \quad (3)$$

ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación rige la dinámica de los fluidos derivada de la segunda ley de Newton: esta variación de la cantidad de movimiento de un objeto responde a las fuerzas que actúan sobre él. Aplicando este principio físico al volumen de control, y teniendo en cuenta el producto, se calculó la cantidad de movimiento por unidad de volumen de la partícula fluida.

CANTIDAD DE MOVIMIENTO (*MOMENTUM*)

$$Mx \frac{u}{t} + u \frac{(\dot{u})}{x} + v \frac{(\dot{u})}{y} + w \frac{(\dot{u})}{z} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{(x)} + v \frac{^2(u)}{x^2} + v \frac{^2(u)}{y^2} + v \frac{^2(u)}{z^2} \quad (4)$$

$$My \frac{v}{t} + u \frac{(\dot{v})}{x} + v \frac{(\dot{v})}{y} + w \frac{(\dot{v})}{z} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{(y)} + v \frac{^2(v)}{x^2} + v \frac{^2(v)}{y^2} + v \frac{^2(v)}{z^2} \quad (5)$$

$$Mz \frac{w}{t} + u \frac{(\dot{w})}{x} + v \frac{(\dot{w})}{y} + w \frac{(\dot{w})}{z} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{(z)} + v \frac{^2(w)}{x^2} + v \frac{^2(w)}{y^2} + v \frac{^2(w)}{z^2} \quad (6)$$

BALANCE DE ENERGÍA

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_i \quad (7)$$

$$\frac{E}{t} + u \frac{E}{x} + v \frac{E}{y} + w \frac{E}{z} = \frac{\lambda}{C_p} \frac{^2E}{x^2} + \frac{\lambda}{C_p} \frac{^2E}{y^2} + \frac{\lambda}{C_p} \frac{^2E}{z^2} \quad (8)$$

Aceleración local + tres términos de advección = difusión

Donde:

x, y, z = son los ejes del sistema coordenado

u, v, w = son los componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad

ρ = densidad del fluido

P = presión absoluta

E = cantidad de calor del fluido

Cp = calor específico del fluido

λ = conductividad térmica

ν = viscosidad cinemática del fluido

Considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante (características de un fluido como el agua), el desarrollo de las ecuaciones de *momentum* para un flujo tridimensional y tridireccional es y. En el caso de encontrarse en presencia de un campo gravitatorio, la ecuación (9) ha de ser modificada, de acuerdo con la ecuación (4), sumándole al gradiente de la presión un término correspondiente a la fuerza que ejerce la gravedad sobre cada elemento de volumen, así como se presenta a continuación.

$$\left(\frac{u}{t} + u \frac{u}{x} + v \frac{u}{y} + w \frac{u}{z} \right) = -\frac{p}{x} + g_x + \mu \left(\frac{^2u}{x^2} + \frac{^2u}{y^2} + \frac{^2u}{z^2} \right) \quad (9)$$

$$\left(\frac{v}{t} + u \frac{v}{x} + v \frac{v}{y} + w \frac{v}{z} \right) = -\frac{p}{y} + g_y + \mu \left(\frac{^2v}{x^2} + \frac{^2v}{y^2} + \frac{^2v}{z^2} \right) \quad (10)$$

$$\left(\frac{w}{t} + u \frac{w}{x} + v \frac{w}{y} + w \frac{w}{z}\right) = -\frac{p}{z} + g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{x^2} + \frac{\partial^2 w}{y^2} + \frac{\partial^2 w}{z^2}\right) \quad (11)$$

La ecuación de continuidad para flujo incompresible se define como:

$$\frac{u}{x} + \frac{v}{y} + \frac{w}{z} = 0 \quad (12)$$

Donde al prescindir de los términos ρ y ν , las ecuaciones tienen cuatro incógnitas (u , μ , w y p). Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales. A partir de estas ecuaciones se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados (Hernández, 2014). Sin embargo, se describe las ecuaciones para su mejor comprensión.

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \rho \bar{g} - \bar{\nabla} p + \mu \bar{\nabla}^2 \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \bar{\nabla} (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) \quad (13)$$

Excepto para flujos especiales y muy simplificados, las ecuaciones de Navier-Stokes se han resistido a ser solucionadas desde su desarrollo original. Actualmente, con el avance de las computadoras, se ha podido solucionar diversos fenómenos representados por estas ecuaciones. Aunque técnicamente son aproximadas, muchas de ellas han resultado ser válidas (Rubio et al., 2013).

PROCESO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES

Se desarrolló la simulación en el Ansys Fluent siguiendo las siguientes etapas: a) geometría (selección, parámetros, dominio, forma y tamaño); b) malla (estructura métrica y calidad); c) física (propiedades de flujo, modelo matemático y condiciones de frontera), d) reporte (parámetros calculados, verificación y validación), y e) posprocesamiento (gráficos, vectores y trayectorias). Esta metodología fue considerada para evitar cualquier contratiempo en el proceso (Torres & Naidiuk, 2018).

- a. **Modelo geométrico:** es la herramienta de dibujo llamado 3D del Ansys-DesignModeler. A partir de esta geometría se logró importar cualquier módulo geométrico del sólido en 2D y 3D. Sobre este proceso se obtiene la tecnología del mallado con el *software* Autodesk Inventor (Autodesk, 2003).
- b. **Generación de malla:** el mallado en Ansys-Meshing se desarrolló por la fragmentación del sólido en pequeños elementos llamados volúmenes finitos, los cuales pueden ser de tipo hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. Con la combinación de estas formas se puede llevar a cabo la fragmentación de cualquier geometría ajustando dichos elementos a la topología del dominio por modelar.
- c. **Física Set-Up en FLUENT:** dentro de interfaz de Ansys Fluent, y siguiendo la física y la solución de las etapas de la simulación, se le conoce como Set-up al apartado donde se seleccionan los parámetros, ecuaciones, modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución para llevar a cabo la simulación. Al desarrollar los esquemas de solución (basado en presión y densidad), estado del flujo (estacionario o transitorio), modelos de turbulencia (κ - ϵ , κ - ω , Reynolds Stress, etc.), esquemas de solución (¡PRESTO!, SIMPLE, SIMPLEC, etc.), grado de solución (1^{er} orden, 2^{do} orden, implícito, ex-

plícito, etc.), entre otros. Además, dentro de este apartado, se seleccionan los pasos de tiempo (*time-steps*) en los que se requiere llevar a cabo la solución, el número de iteraciones, etc. Esto según el fenómeno de transporte de la especie que se tenga, el poder computacional disponible y el grado de exactitud deseado para obtener la composición de combustible.

- d. **Condiciones de frontera:** Ansys Fluent y las condiciones de frontera de entradas, salidas, paredes y orificios son establecidas en el dominio por simular, según la zona de la geometría. Las combinaciones y la coherencia del modelo geométrico, dentro de la etapa de selección de las físicas, que se asignaron valores de las condiciones iniciales de todas aquellas fronteras correspondientes, analizados con todos estos parámetros de simulación de combustión de la especie *Piptocoma discolor* y se obtuvo las condiciones de contorno (Porteiro et al., 2009). Al realizar las reacciones de la combustión según la granulometría de partícula de la especie y las propiedades térmicas y químicas, de acuerdo con los datos obtenidos de la investigación de la especie y su configuración granulométrica.
- e. **Reporte del monitoreo de la simulación:** el comportamiento de los resultados en cada interacción, para identificar la solución con tendencia a converger o a divergir, muestran los valores residuales de cada término de las ecuaciones por resolver y los resultados que arroja el *software*, para identificar las anomalías y obtener la solución de la convergencia satisfactoria, de acuerdo con la presión generada en lecho (Ansys, 2013b). Al aumentar la temperatura del gas, se mueven rápidamente por el número de choques contra las paredes, al aumentar la presión del recipiente de la pared fija y su volumen no puede cambiar, ley de Gay-Lussac (García, 1995).
- f. **Reporte de la combustión:** Al aplicar altas temperaturas 723.65°C para la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire. En esta reacción se libera agua, gas cenizas y calor que alcanzan valores superiores a 1700°C. El fuego-calor se propaga por los tres medios o por distintas combinaciones de transferencia de calor, entre ellos constan los siguientes: radiación, convección y conducción.
- g. **Postprocesamiento:** finalmente, a través de Ansys y su módulo de post-procesamiento llamado ANSYS-Results, se obtuvo las variables de respuesta en FLUENT. Los datos fueron analizados y visualizados dentro de ANSYS-Results para interpretarlos mediante distintos gráficos, lo cual facilitó la comprensión del comportamiento de los campos de la velocidad, la turbulencia, la presión, etc. permitiendo obtener asimismo, los archivos y resultados arrojados por FLUENT (Ansys, 2013b).

Resultados y discusión

Muestreo

La estimación de las muestras obtenidas de los diámetros o categorías DAP de la especie fue establecida por González et al. (2021). De los cuatro cantones provincia de la Pastaza, representa una cantidad de árboles promedio de 1 274 árboles/ha anualmente; que fue obtenido directamente y con un peso promedio total 419,26 ton/ha año. Del método indirecto de estimación promedio que cuenta de 0,47 tms/ha año (Pérez, 2004). En relación con el bosque secundario

el Pigüe brinda una mejor alternativa de producción por su crecimiento rápido para su aprovechamiento, obteniendo 32'181.341,47 millones de toneladas métricas anuales de las 100 987 ha. (J. González et al., 2018). Para la combustión a partir del secado, molienda y obteniendo 8 categorías de diferentes tamaños de granulometría.

Granulometría y estructura química

De acuerdo con el tamaño de la astilla efectuada, se procedió al proceso de triturado para obtener una granulometría (min. Diámetro (m) 0.000692; max. Diámetro (m) 0.000693), según la configuración y la reacción de la combustión para el *Piptocoma discolor* (González-Rivera et al., 2018).

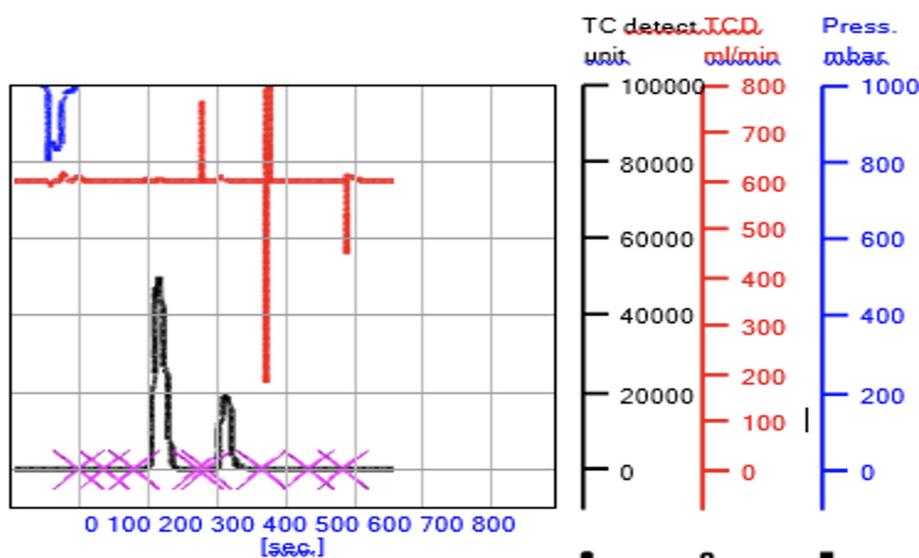
En base a la tabla 1, de los procesos termoquímicos son válidos para su aprovechamiento energético, con propiedades térmicas similares a las de otras especies para biocombustibles y que se aprecian por las diferencias en su estructura (Urien, 2013). En esta especie por su regeneración, crecimiento rápido y por su composición química diferente.

ANÁLISIS INMEDIATO Y PROXIMAL

Con base en los resultados reflejados en la tabla 1, de la conversión de la biomasa en relación con volátiles, carbono, cenizas y su poder calorífico superior se muestra las diferencias de los residuos forestales (Lima, 2013) y de especies forestales (Portero, 2018).

De los resultados de análisis térmicos y químicos, de acuerdo con la tabla 1, influye el poder calorífico superior directamente en su eficiencia energética (Parikh et al., 2005). a diferencias con otras biomasa similares reportados (Portero., 2018), esto permitirá la producción, manejo y aprovechamiento de la biomasa, así como sucede con otras plantaciones que permiten satisfacer la demanda energética (Vignote, 2016). A continuación, en la figura 3, se evidencia las curvas (TCD) de la codigestión-aislados CHNS.

Figura 3. Curvas (TCD) de la codigestión-aislados CHNS



El análisis elemental se llevó a cabo con las diferentes técnicas de aplicaciones antes señaladas. Al comparar estos análisis con su propia especie, su composición varía las curvas de CHNS dentro de la misma especie, tal como se demuestra en la figura 3, debido a su hábitat, edad, suelo y ubicación en el árbol (tronco, ramas y raíces), por esas diferencias de la biodiversidad natural (Miranda & Pereira, 2002).

Según los análisis de la tabla 1, los análisis de la composición elemental (% ase seca) son similares; sin embargo, en condiciones amazónicas, el poder calorífico del *Piptocoma discolor* fue alto frente a otros materiales lignocelulósicos (Portero., 2018). La astilla de la especie en relación con el aserrín cuenta con la misma similitud (Abbas et al., 1994), como en otro estudio considerado por Abreu (2012).

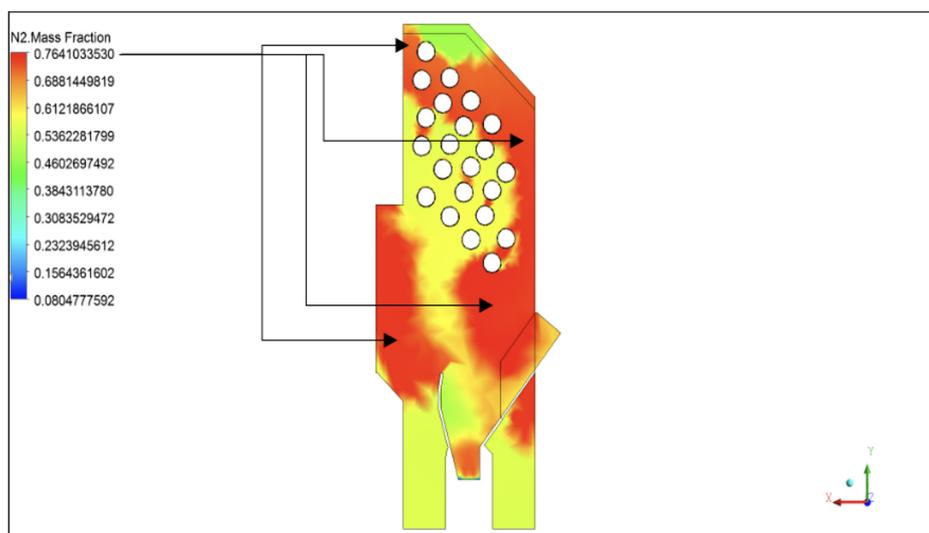
ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DEL PIPTOCOMA DISCOLOR SEGÚN EL ANSYS FLUENT

Según el análisis de la composición química y de sus propiedades térmicas de la especie, tanto en la modelación y simulación computacional como en la experimentación en una mufla, coincidieron los resultados obtenidos del máximo rendimiento, minimizando los problemas asociados ha dicho aprovechamiento. Las tecnologías de la combustión serán utilizadas, por sus principales ventajas de existencia en el país, asociadas a la disminución de emisiones contaminantes, también se considera la programación del *software* ANSYS FLUENT, un programa que valida muchas investigaciones prácticas a nivel mundial (Maldonado, 2018).

Se menciona que la oxidación del carbono implica la utilización de un exceso de aire y fue necesario otorgar cantidades mayores de oxígeno. Los parámetros o componentes de la combustión que fueron analizados son cantidad de N_2 , O_2 , CO_2 , CO , H , presión, temperatura, humedad, energía total y tiempo de quemado de las partículas de biomasa. Así también, se evaluó la efectividad de la simulación desarrollada mediante un análisis de convergencia matemática graficada.

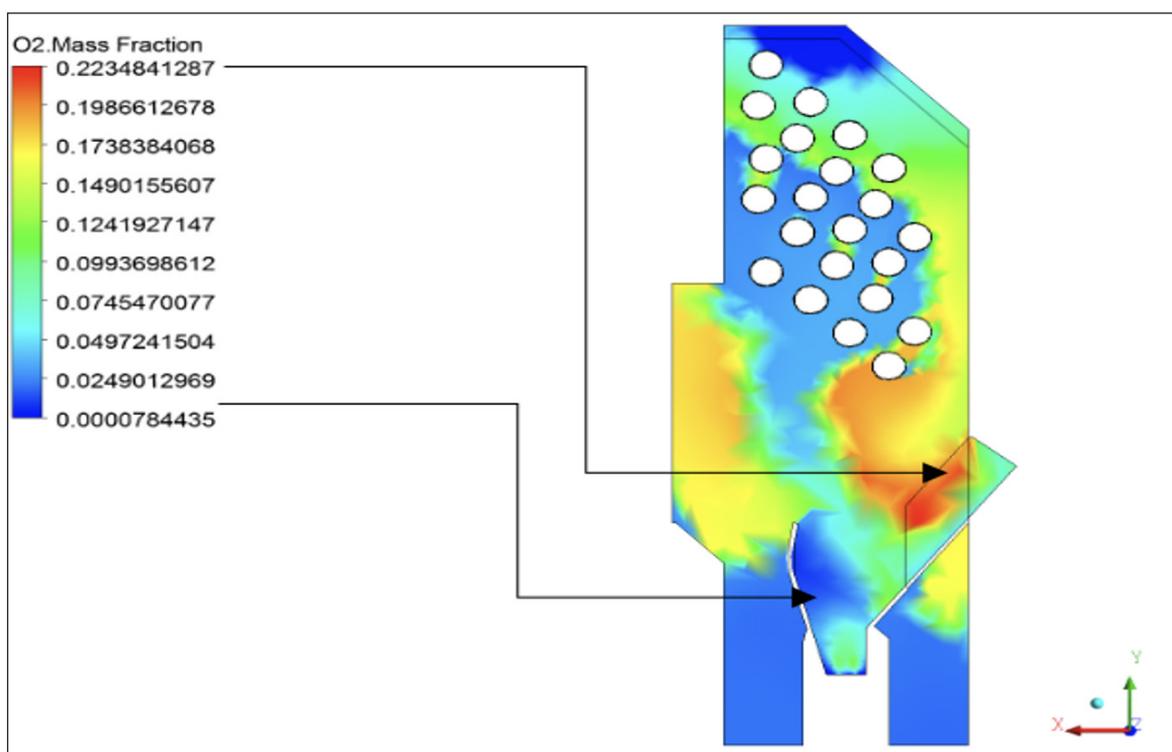
Nitrógeno (N_2): es un gas de combustión que abunda en estado sólido o líquido. Aunque este gas es un componente balastro y proviene del aire principal (figura 4, representada en color rojizo dentro de la gráfica de análisis), con un 76.41 % N_2 y corresponde a un porcentaje normal que se menciona en distintas literaturas que se enfocan en temas de la combustión (Canalís et al., 2014).

Figura 4. Fracción de masa del nitrógeno



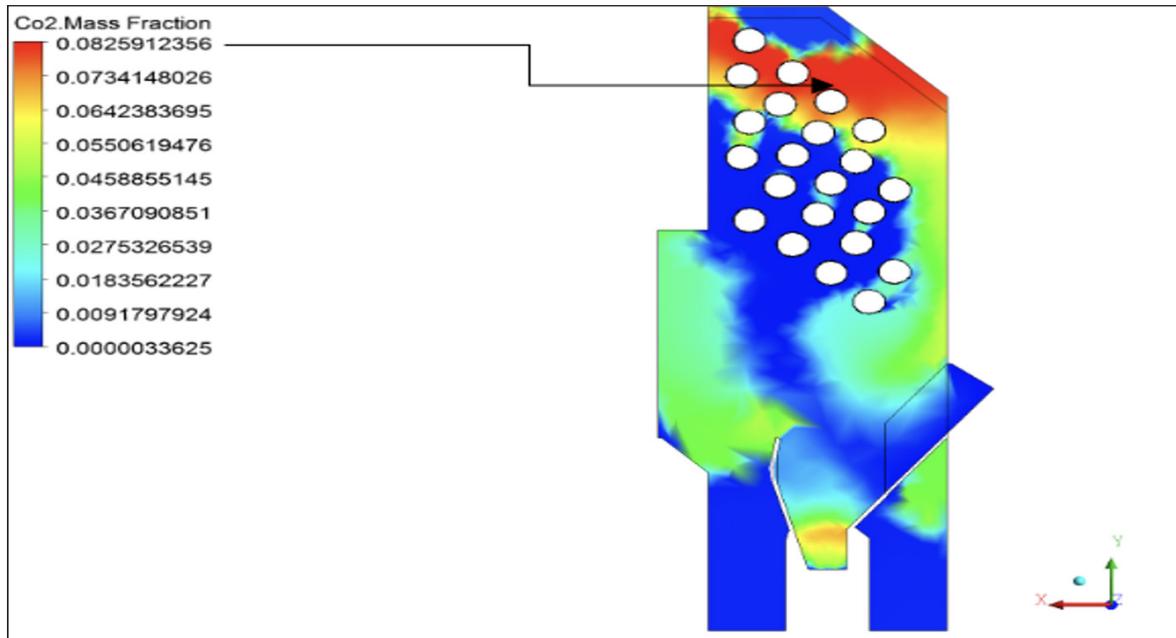
Oxígeno (O_2): el valor fundamental de análisis en toda combustión tiene que ver con el oxígeno presente luego de la oxidación de la especie *Piptocoma discolor*, este, a su vez, proporciona resultados óptimos para analizar el rendimiento de la combustión. En este caso, en la figura 5 se muestra la cantidad de oxígeno que presenta luego de la convergencia a través del tiempo, un 22.34 % en el ingreso principal de la caldera; mientras que en la cama del lecho su valor está entre el 2.4 % y 4.97 %, lo que demuestra que las condiciones normales de operación están acordes con los valores típicos de los gases, líquidos y sólidos que bordean de entre el 2 % y el 6 % (CANALÍS et al., 2014).

Figura 5. Fracción de masa del oxígeno



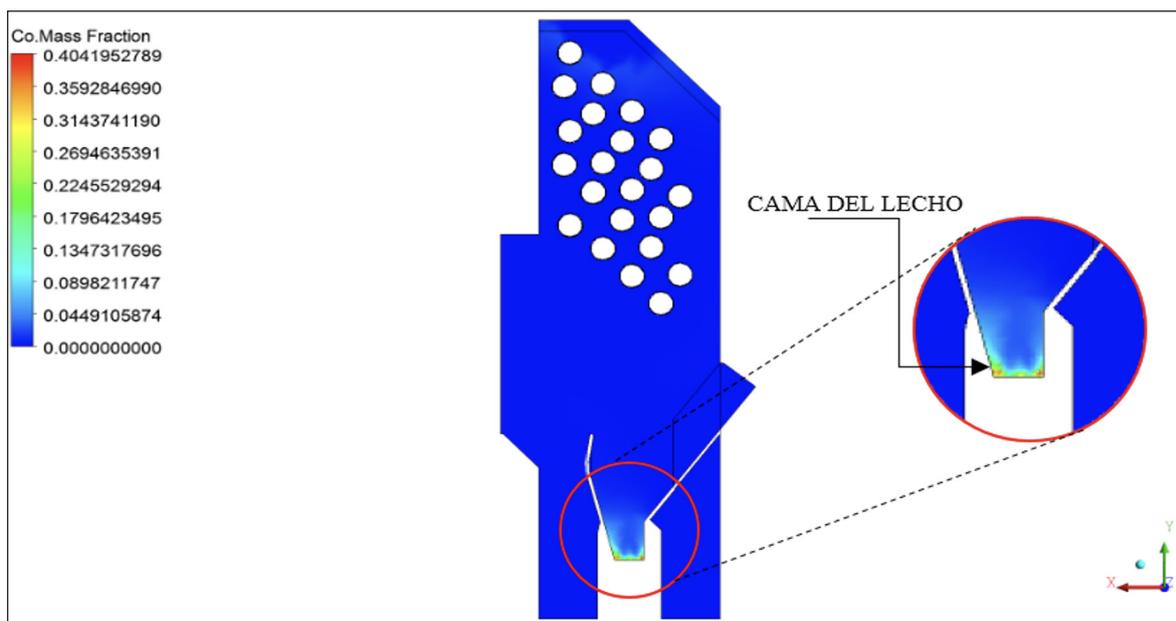
Dióxido de carbono (CO_2): es un parámetro de análisis primordial para conocer el rendimiento de una combustión. Este tiene las siguientes características: es inodoro, incoloro, con un ligero gusto ácido (éste de acuerdo con el tipo de combustible). El resultado favorable es la producción de la mayor cantidad posible de CO_2 , puesto que representa una simulación de la combustión real del trabajo. Los valores obtenidos en cámaras de combustión y hornos de quemado oscilan del 12 % al 14 % como valores típicos. En la figura 6 se demuestra que la combustión del *Piptocoma discolor* no alcanzó a la producción CO_2 del rango antes mencionado. En la simulación se obtuvo 8.25 % CO_2 valor experimental diferente a otras especies (CANALÍS et al., 2014).

Figura 6. Fracción de masa del dióxido de carbono



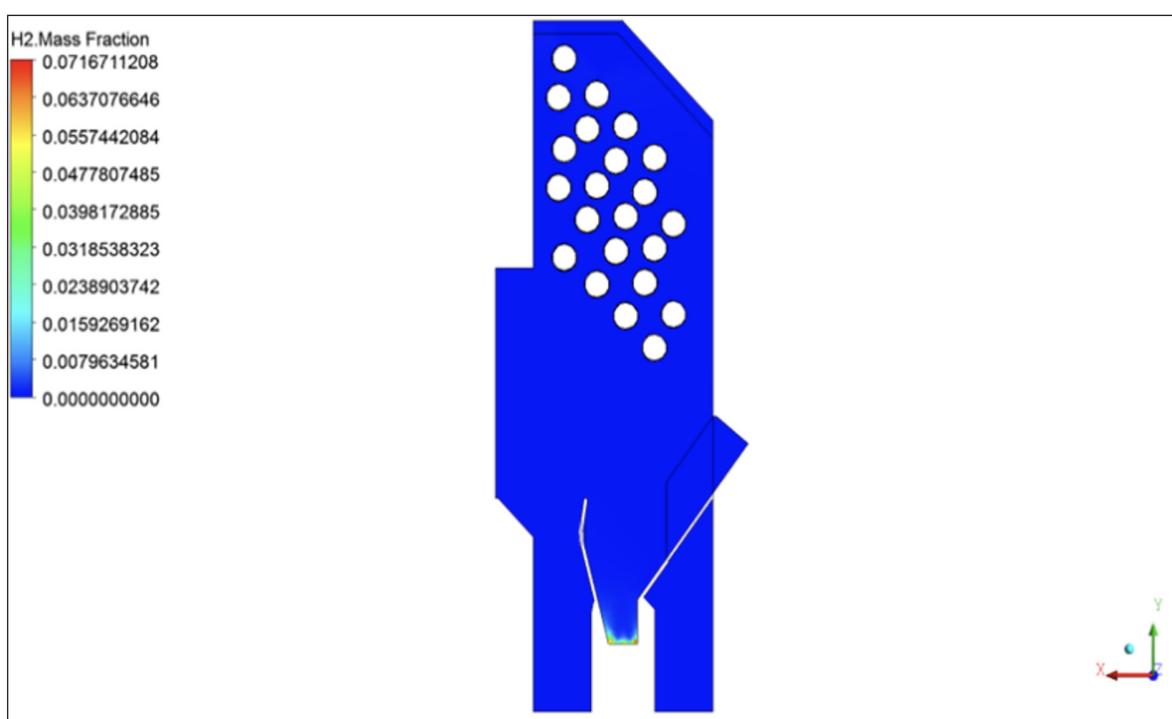
Monóxido de carbono (CO): lo que se busca en toda combustión es que este parámetro o componente se mantenga al mínimo posible para obtener un buen rendimiento en la combustión analizada. Lo ideal sería que este valor fuese cero y que se oxide todo el carbono, lo cual no sucede fácilmente. En la figura 7 se puede apreciar que la especie *Piptocoma discolor*, al ser combustionada, genera un mínimo de producción de CO, con un valor 4.04 % que se desarrolla exclusivamente en la cama del lecho de la cámara, lo cual favorece rotundamente a no emitir elementos tóxicos en el ambiente (CANALÍS et al., 2014).

Figura 7. Fracción de masa de monóxido de carbono



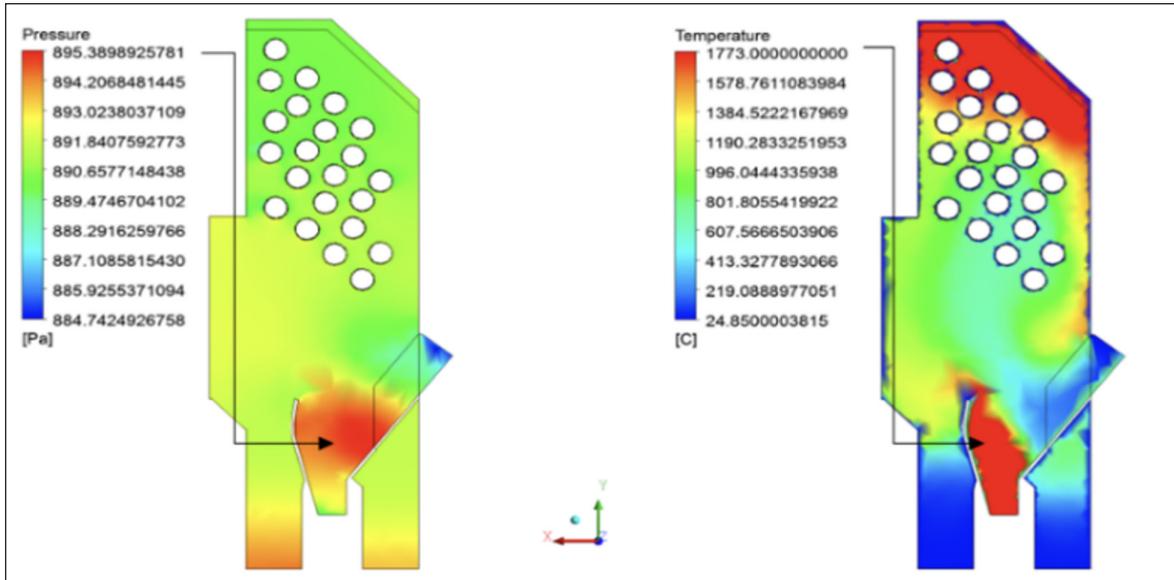
Hidrógeno (H): este un gas inodoro, incoloro e insípido con características diatómicas, que se disocia en átomos libres a altas temperaturas. En la figura 8 se constata que este gas, a medida que la temperatura aumentó, se desvolatizó notablemente a lo largo de todo el volumen analizado. Esto explica que la *Piptocoma discolor*, seca y sometida a altas temperaturas, genera un potencial energético satisfactorio (Saveris, 2014). Al ser alimentada con astillas en el reactor y combustionada a altas temperaturas, el rendimiento fue $71.46 \pm 10.58 \%$ y con los pellets de $66.12 \pm 12.76 \%$. Esto demuestra que la factibilidad de aprovechar astillas, serrín o pellets de esta especie es porque se consigue un menor flujo de alquitranes que pueden generar en las tuberías de las calderas (Torres et al., 2019).

Figura 8. Fracción de masa del hidrógeno



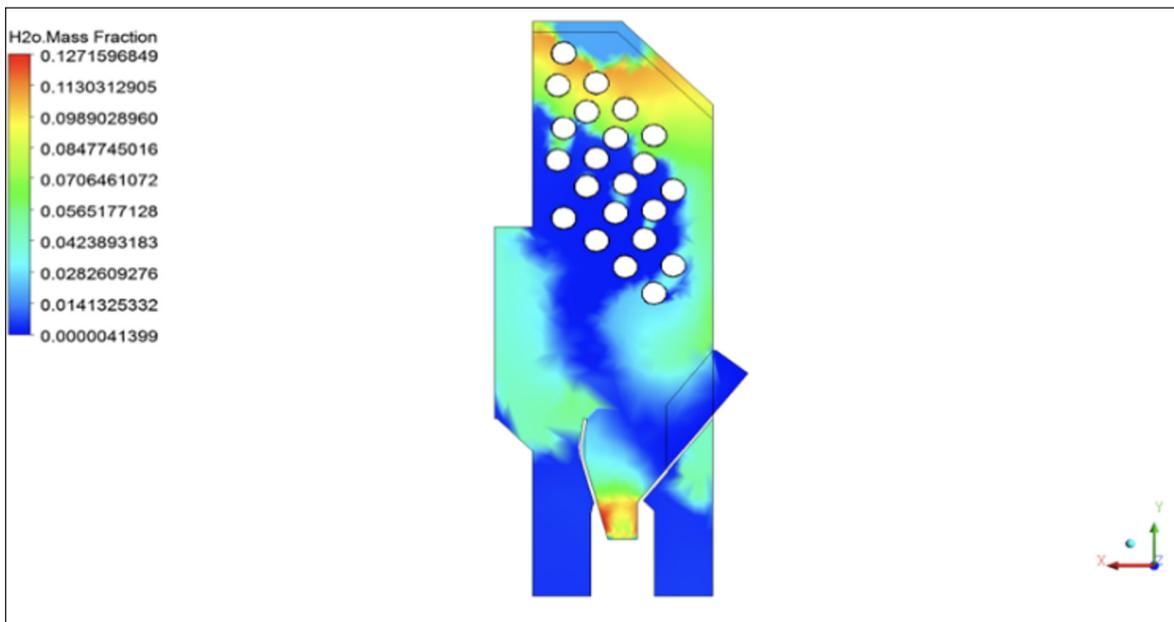
Presión y temperatura: los parámetros de presión y temperatura mostrados en las gráficas de la figura 9 conducen a pensar en la eficiencia del poder energético que posee la especie *Piptocoma discolor*; es decir, en condiciones de combustión, alcanzan valores considerables. En el caso de la temperatura, esta llega a un valor de 1773°C . Esta permite transferir calor por convección mediante los tubos hacia el agua en su interior y logra fácilmente generar vapor saturado óptimo para utilizar en la industria productora de energía eléctrica a partir de turbinas de vapor (Spirax-Sarco, 2013).

Figura 9. Presión y temperatura



Humedad: aunque la mayor temperatura se verifica en la parte superior del horno, en esta zona se nota la humedad y agua volátil, la cual provocaría corrosión significativa en los tubos que transfieren calor. El porcentaje encontrado está entre 7.06 % a 9.89 % de vapor de agua (figura 10).

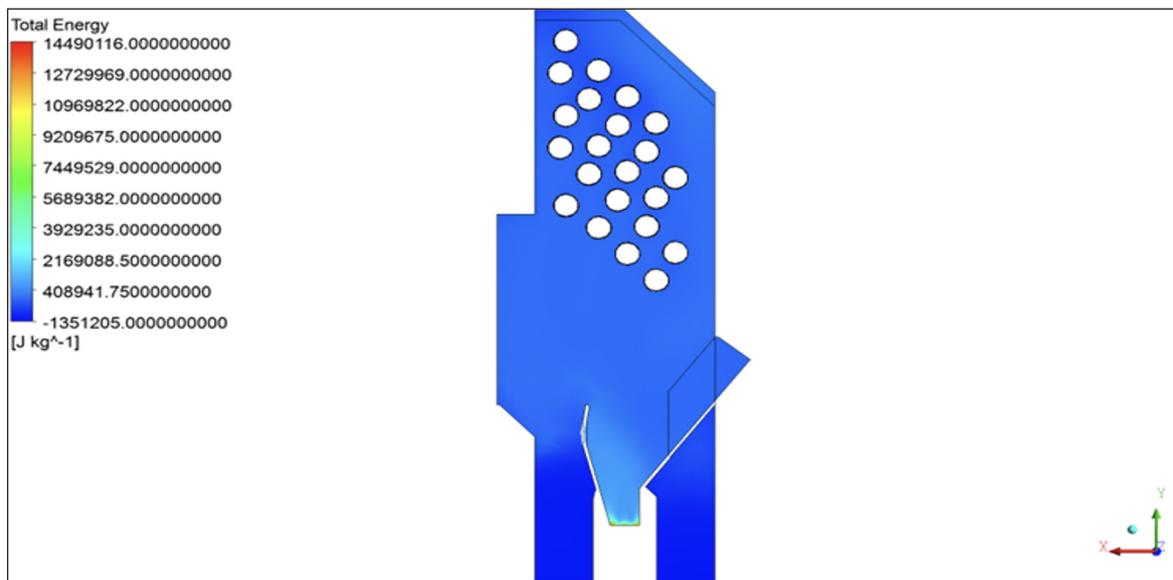
Figura 10. Humedad presente en el interior de la caldera



Energía total: se refiere a la cantidad de potencia energética requerida para quemar cantidades determinadas de biomasa. De acuerdo con la materia seca, se ve que la energía mayor requerida es 14 490 116 J/kg, es decir, en la cama del lecho, donde surge la quema de la biomasa,

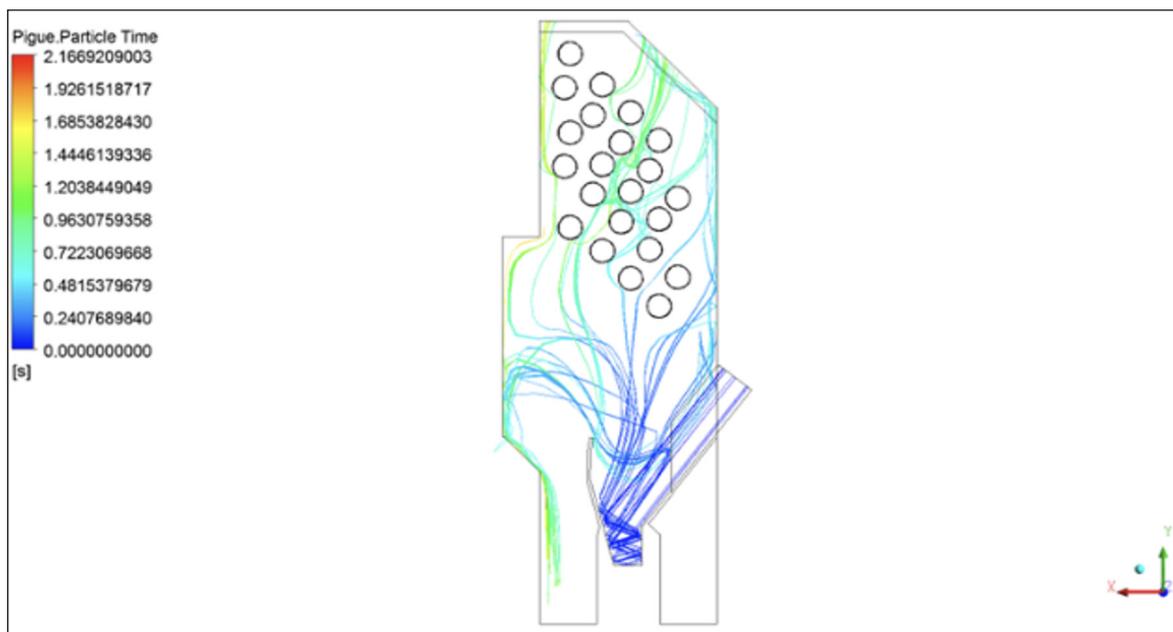
se necesita de un trabajo potencial de 14 490 116 J, lo cual, traducido a Watts en un determinado tiempo, reporta un valor igual a 14 490 116 W; o lo que es lo mismo, 4 025.03 W.h, como consta en la figura 11. Esto concuerda con los estudios enfocados en biomasa (Abarca, 2000).

Figura 11. Energía total



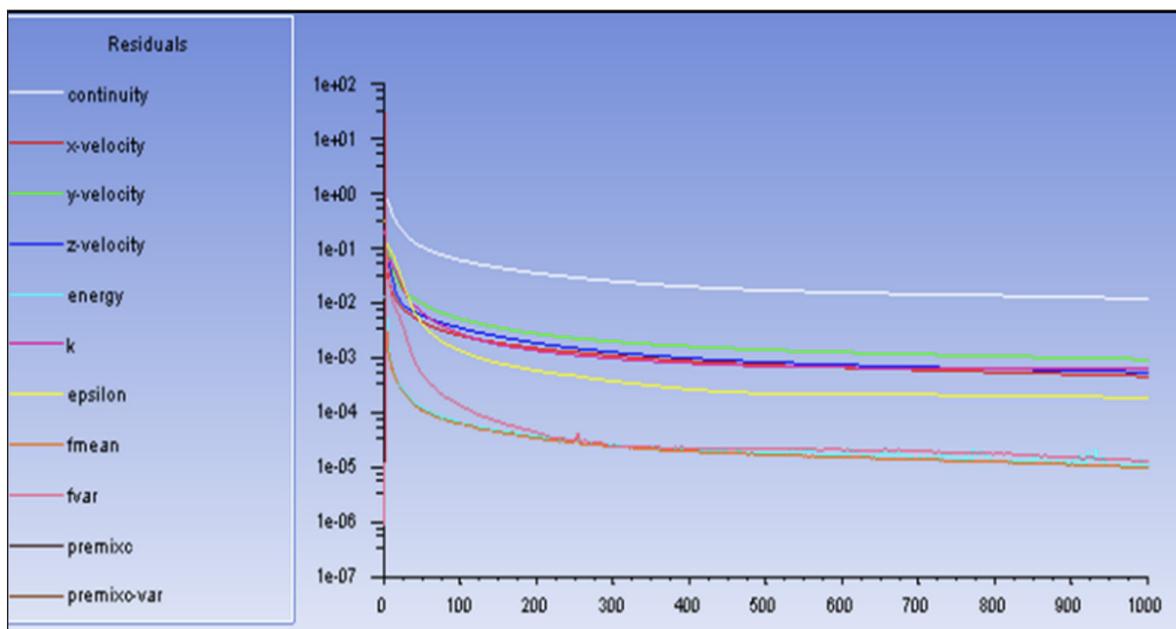
Tiempo de partícula: para lograr un completo quemado de cada una de las partículas de la biomasa, es necesario el paso del tiempo. Este tiempo de quema dependerá mucho del poder energético suministrado en la combustión. En la figura 12 se puede ver que el tiempo máximo de quemado es 2.16 segundos (Valencia, 2013).

Figura 12. Tiempo de la quema total de una partícula



Convergencia (simulación efectiva): el Ansys Fluent, *software* especializado para sistemas de análisis, demuestra su efectividad a través de la convergencia desarrollada en sus gráficas de respuesta de ilustración final de la simulación total (figura 13). Aquí se explica que los algoritmos utilizados para la solución de la quema han sido los correctos y no existe desviación alguna en ninguno de los datos utilizados en este trabajo. Es decir, luego de que el *software* procesa los datos insertados en él, se grafican una serie de curvas de acuerdo con los parámetros estipulados en la solución matemática de la simulación, y estos deben llegar a converger para entender que no existen datos ficticios ni mal interpretados, conocidos como datos basura. Por lo tanto, se concluye que la simulación fue efectiva (Ansys, 2013b).

Figura 13. Ilustración final de la simulación total luego del procesamiento de datos



Al analizar el comportamiento térmico para la aplicación del sistema tecnológico, en la generación de energía eléctrica con ventajas para el sistema de combustión en calderas tipo parrillas y la disminución de emisiones de los gases de la combustión a menores temperaturas de 760°C a 871°C , mientras que, en el sistema de horno en quema directa, conocidos como ciclos Rankine, su temperatura está por encima de los 1204°C . Cuando se trata de madera o residuos forestales, las emisiones de SO_2 son insignificantes y menos óxidos de nitrógeno (NO_x). Al realizar la inversión con un costo menor su eficiencia del proceso de combustión, debe ser evaluada de acuerdo con la potencia necesaria de energía para su aplicación industrial (Loaiza, 2015).

El análisis de la simulación, a través del Ansys Fluent, en relación con la combustión de la biomasa, con una humedad de equilibrio del 12 %, demostró las siguientes relaciones: nitrógeno 76.41 % (N_2), oxígeno 22.34 % (O_2), un valor de gas carbónico 8.25 % (CO_2), monóxido de carbono 4.04 % (CO), hidrogeno 7.16 % (H), con presión de 894 (Pa) y temperatura de 1773°C , que permite generar vapor para producir energía eléctrica con una energía total requerida de 14 490.12 KJ/kg, como trabajo de 14 490.12 KJ. A través de este programa computacional (Rosero, 2018) se ha logrado hacer la validación real que ocurre con esta herramienta de la dinámica de fluidos computacionales, similares a la experimental, a través de los análisis físicos, químicos y térmicos.

cos. Conociendo la información de las ecuaciones y aplicaciones de las energías renovables, los efectos positivos que muestra la especie es que no produce mucha ceniza ni afecta a la tubería de la caldera en la formación de incrustaciones, lo que la convierte en una alternativa para producir energía renovable sin daños al medio ambiente y equipos industriales.

Conclusiones

La provincia de Pastaza y la Amazonía ecuatoriana cuentan con un potencial productivo exuberante de esta biomasa forestal *Piptocoma discolor* que forma parte del bosque secundario, por ser una especie nativa y de crecimiento rápido con características fisicoquímicas y térmicas propicias para utilizarla como fuente de energía renovable.

La simulación dinámica de fluidos y los algoritmos de solución empleados demuestran que el método desarrollado de transporte de especies fue el correcto y la predicción del comportamiento de los gases como producto de la combustión de este fenómeno químico-exotérmico ocurrido en la validación del sistema.

La temperatura producida en la simulación del *Piptocoma Discolor* por efectos de la combustión ofrece valores altos de transferencia de calor para producir vapor saturado, el cual industrialmente se utilizaría como fluido propulsor para turbinas de vapor y transformaría la energía mecánica en eléctrica satisfactoriamente.

En esta simulación se puede constatar que la especie *Piptocoma discolor* emana poca toxicidad al ambiente y que el CO se mantiene al mínimo, que es lo que justamente se busca en una combustión de biomasa. Así, los gases del oxígeno y el hidrógeno muestran comportamientos satisfactorios, donde se ve que sus partículas se disocian notablemente.

Referencias

- Abarca, P. (2000). *Potencia y rendimiento de la caldera*. ACHS. <https://bit.ly/3H6cTC4>
- Abbas, T., Costen, P., Kandamby, N. H., Lockwood, F. C., & Ou, J. J. (1994). The influence of burner injection mode on pulverized coal and biomass co-fired flames. *Combustion and Flame*, 99(3-4), 617-625. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90055-8)
- Abreu, R. (2012). Utilización energética de la biomasa lignocelulósica obtenida de *Dichrostachys cinera* mediante procesos de termodescomposición. En A. e. A (pp. 41-42). Universidad Politécnica delle Marche Dipartimento di science Agrarie.
- Ansys. (2010). Introduction to CFD Methodology. *Ansys Fluent*, 2, 17. <https://bit.ly/3ve82LP>
- Ansys. (2013a). *Guía de teoría fluido ANSYS*. 15317 814. <https://bit.ly/3vfhdfg>
- Ansys. (2013b). *Guía teoría fluido ANSYS*. <https://bit.ly/3t1KZBf>
- Autodesk. (2003). *Manual de usuario Autodesk* (Copyright ed.).
- Camacho, P., & Murillo, O. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas. *Agronomía Costarricense*, 21(2), 189-205. <https://bit.ly/355EwgO>
- Canalís, P., Royo, J., & Sebastián, F. (2014). Co-combustión de carbón y biomasa. *ROSAL MABRIK*.
- Castelló, M., Barrera, C., Pérez, É., & Betoret, N. (2017). *Reducción del tamaño de partículas y tamizado de sólidos*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://bit.ly/3g3o5n7>
- Castro, M. (2011). *Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador*. CEDA. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00344.pdf>
- Cruz, Y., Valdés, P., Laffita, A., Gómez, M., & Chuairey, C. (2020). Dinámica de fluido computacional: Revisión y análisis de las aplicaciones en la ingeniería. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(4), 93-104. <https://bit.ly/3u3j1r9>

- Fernández-Puratich, H., & Oliver-Villanueva, J. V. (2014). Cuantificación de biomasa y valor energético de renovales de *Quercus ilex* en condiciones mediterráneas. *BOSQUE* (Valdivia), 35(1), 65–74. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100007>
- García, M. (1995). La ley de Amontons y las indagaciones sobre el aire en la Academia de Ciencias de París (1699-1710). *Asclepio*, 47(1), 53–80. <https://doi.org/10.3989/asclepio.1995.v47.i1.451>
- Gobierno de Navarra. (2015). *Combustibles de biomasa: Tipos y características. III Plan Energético de Navarra, horizonte 2020. Comisión Mixta de la Biomasa Forestal de Navarra*. <https://bit.ly/33YHx1l>
- González-Rivera, J., Jaramillo-Ponce, J., Pérez-Quintana, M., Sablón-Cossio, N., & Oliva-Merencio, D. (2018). Evaluación físico-mecánicas de tableros a base del aserrín de pigüe (*Piptocoma discolor*) y bagazo de caña de azúcar en Pastaza. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 7(2), 95–104. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6977652>
- González, J., Coronel, B., Quevedo, V., Uvidía, H., Oliva, D., Morón, C., & Campo, M. (2021). Biomass potential and kinetics of drying model of *Piptocoma discolor* (pigüe) as a source of renewable energy source in Ecuador. *Enfoque UTE*, 12(1), 74–90. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.695>
- González, J., Papue, A., González, V., Borja, A., & Oliva, D. (2018). Crecimiento y conservación de *Piptocoma discolor* (pigüe) en la provincia de Pastaza, Ecuador. *CFORES: Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(3), 366–379. <https://bit.ly/3o0f0EE>
- González, J. E., Coronel, B., Quevedo, V., Uvidía, H., Oliva, D., Morón, C., & Robles, M. (2020). Potencial de la biomasa y la cinética del modelo de secado de *Piptocoma discolor* (pigüe) como fuente de energía renovable en el Ecuador. *Enfoque UTE*, 12(1), 74–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.695>
- González, J. E., Morillo, C., García, J., Cárdenas, J., & Oliva, D. (2019). Determinación del potencial energético del pigüe (*Piptocoma discolor*) en la Amazonía ecuatoriana. *Ciencia Digital*, 3(1), 78–97. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i1.298>
- Hernández, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. Biblioteca VIRTUALPRO.
- Hetsch, S. (2004). *La comercialización de madera en la provincia de Pastaza*. <https://bit.ly/3G5qrMX>
- Lima, L. (2013). *Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital.
- Loaiza, M. (2015). *Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio académico.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2014). *Evaluación nacional forestal: Resultados*. FAO Ecuador. <https://bit.ly/3H4Rucz>
- Maldonado, J. (2018). *Análisis matemático y simulación numérica del comportamiento de fluidos en un caldero pirotubular vertical* [Tesis de posgrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio institucional.
- Miranda, I., & Pereira, H. (2002). The variation of chemical composition and pulp yield with age and growth factors in young *Eucalyptus globulus*. *Wood and Fiber Scienc*, 34(1), 140–145. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/49/49>
- Murillo, O. (2004). *Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal*. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Nogues, F., Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa* (Vol. 1). Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 85(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Pérez, P. (2004). Cuantificación de los recursos de biomasa forestales en la provincia de Soria y evaluación de alternativas para su aprovechamiento energético. *Montes* (75), 17–25.

- Porteiro, J., Collazo, J., Patiño, D., Granada, E., Moran, J., & Míguez, J. (2009). Numerical modeling of a biomass pellet domestic boiler. *Energy & Fuels*, 23(2), 1067–1075. <https://doi.org/10.1021/ef8008458>
- Portero, H. (2018). *Estudio experimental de peletizado en planta piloto y de combustión en caldera de biomasa a baja potencia* [Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha]. Repositorio RUIdeRA.
- Rezaei, H., Jim, C., Lau, A., & Sokhansanj, S. (2016). Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. *Podwer Technology*, 301, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.016>
- Rosero, W. (2018). *Utilización de dinámica de fluidos computacional CF-ANSYS fluent para la simulación de un gasificador* [Tesis de grado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio institucional.
- Rubio, J. d. J., Ordaz, G., Jiménez, M., & Cabrera, I. (2013). Solución general de la ecuación de Navier-Stokes para la dinámica de un fluido viscoso homogéneo en una tubería abierta. *Revista Mexicana de Física*, 59(3), 217–223.
- Saveris, T. (2014). Distribución de vapor. testo Saveris 2. <https://bit.ly/3LQPVBA>
- Solar, A. (2013). *Metodología para la optimización del aprovechamiento energético de los recursos de biomasa: Aplicación a la comunidad valenciana* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio institucional.
- Spirax-Sarco, S. A. (2013). *Distribucion del vapor*. TR-GCM-03. <https://bit.ly/3viUuyK>
- TAPPI. (2018). *TAPPI standards: Regulations and style guidelines*. <https://bit.ly/3H4hFA4>
- Naidiuk, L., & Torres, B. (2018). *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys*. Abya-Yala.
- Torres, C., Chaves, M., Urvina, L., & Moya, R. (2019). Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo *downdraft*. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(1), 23–34. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3847>
- Urien, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. Digital.CSIC. <https://bit.ly/3r3uB3z>
- Valencia, W. J. J. (2013). Modelamiento y simulación de la combustión de una partícula de carbón en un gas combustible. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Fdocuments.ec. <https://bit.ly/3KGiJMJ>
- Vignote, S. (2016). *Procesos termoquímicos de la madera y en general de la biomasa*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21490.50889>
- Yndurain, F. (2005). *Energía: Presente y futuro de las diversas tecnologías*. Academia Europea de Ciencias y Artes. <https://bit.ly/3u3w9wr>
- Zuñiga, E. (2018). *Modelación y simulación de la combustión de Piptocoma discolor (pigüe) como fuente biomásica con el uso de fluidos dinámicos computacionales* Universidad Estatal Amazónica]. Puyo.

Caracterización de agentes de consumo energético en el sector residencial del Ecuador basada en una encuesta nacional y en los sistemas de información geográfica para modelamiento de sistemas energéticos

(Characterization of energy consumption agents in the residential sector of Ecuador based on a national survey and geographic information systems for modelling energy systems)

Diego Moya¹, Dennis Copara², Jorge Amores³, Manolo Muñoz⁴, Ángel Pérez-Navarro⁵

Resumen

El sector residencial es un ejemplo de los retos que se presentan al momento de modelar la heterogeneidad del sistema energético en búsqueda de la evaluación de la política energética. Algunas de las características que influyen en la oferta y demanda de energía del sector residencial son el tipo de consumo, el ingreso de los hogares, la composición familiar, el tipo de vivienda, la zona climática de residencia, entre otras.

El objetivo de esta investigación es caracterizar los agentes de consumo energético en el sector residencial del Ecuador. Para lograrlo, en este artículo se presenta una metodología que combina una encuesta nacional (en línea y puerta a puerta) con sistemas de información geográfica (SIG). La encuesta permite definir las principales motivaciones, objetivos de inversión y método de decisión de los agentes al momento de renovar o mantener tecnologías energéticas del hogar. Para esto, se ha clasificado a los agentes con base en su nivel de ingresos. Los SIG permiten localizar espacialmente a los agentes y tener una estimación sobre la población que pertenece a cada agente por el nivel de ingreso. Los resultados se presentan por nivel de ingreso para cada grupo de agentes y se geolocalizan caracterizándolos de forma espacial. Se determina los atributos cuantitativos de cada agente con el fin de ser utilizados en modelación de sistemas de energía.

Palabras clave

Modelo basado en agentes, sistemas de información geográficas, inversión.

Abstract

The residential sector is an example of the challenges that arise when modelling the heterogeneity of the energy system to assess energy policy. Some of the characteristics that influence the supply and demand of energy in the residential sector are the type of consumption, household income, family composition, type of dwelling, the climatic zone of residence, among others. The objective of this research is to characterize the agents of energy consumption in the residential sector of Ecuador. To achieve this goal, this article presents a methodology that combines a national survey (online and door-to-door) with Geographic Information Systems (GIS). The survey allows defining the main motivations, investment objectives and decision method of the agents when renewing or maintaining home energy technologies. For this, the agents have been classified based on their income level. GIS allows the agents to be spatially located and to have an estimate of the population that belongs to each agent by income level. The results are presented by income level for each group of agents and the agents are geolocated, characterizing them spatially. The quantitative attributes of each agent are determined in order to be used in energy systems modelling.

Keywords

Agent-based model, geographic information systems, investment

1 Imperial College London. South Kensington, United Kingdom / Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador / Institute for Applied Sustainability Research (IASUR). [da.moya@uta.edu.ec, https://orcid.org/0000-0003-4839-4259]
2 Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. [dcopara1688@uta.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-2573-820X]
3 Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. [jramores@uta.edu.ec, https://orcid.org/0000-0003-2233-1380]
4 Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. [mmunoz@uta.edu.ec, https://orcid.org/0000-0001-5897-1211]
5 Universitat Politècnica de València. Valencia, Spain. [anavarro@iie.upv.es, https://orcid.org/0000-0003-2274-0520]

Introducción

Los modelos de sistemas energéticos (MSE) ayudan a evaluar la demanda de energía mediante el desarrollo de escenarios que simulan las cadenas de suministro, conversión, transporte y el uso final de la energía. Los MSE pueden usarse para estudiar todos los sectores energéticos de la economía, tales como primario, de conversión, de refinación, de movilidad, industrial, comercial, agrícola y residencial. Particularmente, el consumo de energía en el sector residencial representa el 32 % del uso final de la energía, la cual es utilizada en calefacción y refrigeración de espacios, iluminación y uso de electrodomésticos (Rode et al., 2014). La demanda de energía en los hogares puede variar en función del desarrollo económico, cultural y características geográficas de una ciudad, un país o una región (Ma & Cheng, 2016; Mastrucci et al., 2017). Este consumo de energía está relacionado directamente con las emisiones y el cambio climático (Obama, 2017). Por lo tanto, es necesario evaluar el comportamiento de las variables que influyen en el consumo de energía en el sector residencial, para generar estrategias adecuadas al uso de la energía. Los MSE emergen como una herramienta para estudiar el sector energético residencial.

Asimismo, los MSE sirven para el análisis energético desde ciudades hasta a nivel mundial (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014; Lind & Espegren, 2017). Estos modelos se van perfeccionando en función del tiempo con la aplicación de nuevas técnicas y herramientas, por lo que se obtienen resultados más confiables. De forma general, los MSE se clasifican en 1) modelos de optimización, 2) modelos de simulación, 3) sistemas de potencia y modelos del mercado eléctrico y 4) escenarios cualitativos y métodos mixtos (Herbst et al., 2012; Pfenninger et al., 2014). Además, Hall y Buckley (2016) proponen una clasificación en tres grupos: 1) propósito y estructura, 2) características tecnológicas y 3) descripción matemática. García-Gusano et al. (2018) clasifican a los MSE en dos grupos: 1) modelos basados en la simulación que establece parámetros para aprobar políticas energéticas y 2) modelos basados en optimización que exploran enfoques tecnoeconómicos (García-Gusano et al., 2018).

Todos estos tipos de modelos consideran los diversos factores que influyen en la oferta y la demanda en el sector energético; que depende de: los recursos renovables y no renovables, las tecnologías de conversión y transformación, el almacenamiento, la transmisión y distribución, el uso final de la energía en las diferentes tecnologías de cada sector (industria, residencial, comercial, transporte y agricultura), el mercado, el clima (Andersen, 2015; et al., 2013), crecimiento económico, estructura comercial (Liang & Zhang, 2011; Wei et al., 2017), factores sociales (Deller, 2018; Trotta, 2018), el comportamiento humano (agentes) al momento de usar la energía e invertir en nuevas tecnologías que satisfagan su demanda energética (Pfenninger et al., 2014), entre otros.

Esta investigación tiene como objetivo contribuir en la caracterización de agentes de consumo energético en el sector residencial del Ecuador. Para lograrlo, en este artículo se presenta una metodología que combina una encuesta nacional (en línea y puerta a puerta) con sistemas de información geográfica (SIG). La encuesta fue diseñada para caracterizar agentes de consumo energético y aplicarla posteriormente en el modelado de sistemas de energéticos.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 1 se realiza una detallada revisión de la literatura; en la sección 2 se aborda la metodología; en la 3 se presenta los resultados de la caracterización de los agentes, y en la 4, las conclusiones del estudio.

Modelos energéticos

La modelación del sistema energético en el sector residencial es vital para conocer la vía de reducción de emisiones y planificar el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente (Sousa et al., 2017). Los sistemas de energía de los edificios sirven para gestionar el consumo de energía, buscar la eficiencia energética y el confort térmico a través del monitoreo sobre el inventario de variables, el efecto del entorno y el comportamiento del clima (Harish & Kumar, 2016). Un MSE del sector residencial tiene un mayor alcance y, además, abarca los efectos del consumo de energía de los hogares en el cambio climático y viceversa (Clarke et al., 2018). A continuación, se describe varios modelos energéticos y sus características principales.

El Global Change Assessment Model (GCAM) es un modelo de simulación dinámica recursiva que representa las interacciones entre el sector energético, la densidad poblacional, el uso del agua y el comportamiento del clima. El GCAM es una herramienta de evaluación integrada, con un rango importante de tecnologías, que busca representar las interacciones del sector energético, el uso de la tierra, el agua y la mitigación del clima en la economía (Muratori et al., 2017).

El National Energy Modelling System (NEMS) es otro modelo aplicable únicamente al contexto de los Estados Unidos. El NEMS contiene varios módulos con metodologías específicas de simulación para cada sector energético, agrupados en sectores de suministro, conversión, demanda y el mercado de energía (Daniels, 2017, agosto 31).

El Open Source Energy Modelling System (OSeMOSYS), o sistema de modelado energético de código abierto, corresponde a un modelo de optimización lineal desarrollado en un arreglo modular. La disponibilidad abierta y flexibilidad para modelar proyecciones energéticas a largo plazo ha incrementado el uso de OSeMOSYS (Gardumi et al., 2018).

El modelo Price-Induced Market Equilibrium System (PRIMES), o sistema de equilibrio del mercado inducido por el precio, simula la oferta y la demanda de energía. Este modelo se ha utilizado en varios gobiernos de la Unión Europea y empresas privadas en planificación energética (E3MLab, 2014). El modelo PRIMES está organizado en módulos que representan el comportamiento de un agente específico, un demandante y/o un proveedor de energía. La principal característica de PRIMES es su capacidad para soportar el análisis de la política en el lado de la demanda como la demanda de electricidad y calor en el sector residencial (Fragkos et al., 2018). De todos los modelos descritos brevemente, es necesario profundizar en la caracterización de los agentes de consumo energético en los sectores de uso final de la energía. Parametrizar las características heterogéneas de los agentes cuando demandan y consumen energía es un reto que los modelos energéticos aún deben afrontar.

Modelación basada en agentes

Un modelo basado en agentes (MBA) es una importante herramienta que ayuda a representar las complejidades de la demanda de energía en medio de las características heterogéneas de los consumidores (agentes). En el tema de la demanda energética, el MBA aporta en el análisis de diversas variables de relaciones sociales, limitaciones espaciales e influencia económica. La función que cumple el MBA es representar la heterogeneidad en las características y comportamientos de los actores analizados, lo cual sirve para interpretar el comportamiento de un sistema. No obstante, la heterogeneidad en el MBA es de suma importancia, puesto que ayuda a crear nuevas variables energéticas que servirán de apoyo (Rai & Henry, 2016).

Brown & Robinson (1969), al momento de agregar heterogeneidad a los agentes, evidenciaron un efecto significativo en los resultados del modelo. De igual manera, Rai y Henry (2016) analizan la interacción de la heterogeneidad y, apoyándose en varias teorías, adoptando el comportamiento de los agentes y su influencia en la elección de tecnologías de bajas emisiones de carbono. Gracias a los MBA se logra capturar los hábitos grupales de los grupos de interés y el mecanismo de impacto de factores influyentes críticos. La manera de analizar el consumo energético sería enfocar la modelación no solamente en los dispositivos que consumen energía (Tian & Chang, 2020), sino también en quienes usan esos dispositivos. El modelo debe construirse con el nivel acertado de descripción, con la cantidad justa de detalles para cumplir su propósito (Bonabeau, 2002). Los modelos basados en agentes constituyen modelos computacionales, cuyo análisis debe realizarse a través de la simulación (Pereda & Zamarreño, 2015).

La expansión de la población urbana ha permitido elaborar distintos escenarios sobre la evolución de la población y así planificar de una forma racional y sostenible los futuros desarrollos urbanos. En términos generales, la utilización de los MBA, en el campo de la simulación urbana, suele producir diferentes tipos de análisis y escenarios prospectivos (Cantergiani & Gómez Delgado, 2016). Estos pueden ser desagrupados en predictivos (carácter prescriptivo), exploratorios (carácter explicativo) y, en algunos casos, normativos (deseables u óptimos). El aporte del MBA a la exploración del fenómeno de crecimiento urbano a escala subregional ayuda entender la dinámica con el objetivo de apoyar y mejorar las actividades de planificación (Cantergiani & Gómez Delgado, 2016).

Tanto las organizaciones como el entorno que las rodean son sistemas muy complejos a partir de la interacción entre todos los agentes que los compone. Son sistemas altamente sensibles a la incertidumbre, y sus comportamientos no corresponden a la intensión de los individuos que los generan, lo que produce inesperados y contados resultados intuitivos. Para esto se debe tener en cuenta los resultados que ofrecen contemplando que una predicción exacta es poco probable (Geog.leeds, n.d.). La modelación y simulación basada en agentes (MSBA) ha sido la técnica de mayor aplicación para la investigación en ciencias sociales. De esta forma, el MBA se emplea en varios campos, como Sachs et al. (2019) lo emplean en el sector residencial.

Otro sector de aplicación se constata en el trabajo de Burg et al. (2021), en el cual las decisiones de los agricultores están influenciadas por una interacción entre factores externos en los que opera el agricultor. El campo de la economía que según Farmer y Foley (2009), los modelos basados en agentes podrían ayudar a evaluar las políticas diseñadas para fomentar la recuperación económica. El MBA se caracteriza por la existencia de muchos agentes que interactúan usualmente en ausencia de un controlador o planificador central. Debido a esto, los comportamientos emergentes de la interacción de los agentes son difíciles de predecir y/o anticipar debido a la capacidad adaptativa entre las partes (Susatama et al., 2017).

En los MBA, los agentes se formalizan como entidades que toman decisiones según sus objetivos, la información sobre el entorno y sus expectativas sobre el futuro. Los objetivos, la información y las expectativas son afectados por la interacción con otros agentes que pueden ser adaptativos, es decir, que pueden cambiar sus decisiones y su comportamiento. El desarrollo de los MBA en el modelado de la toma de decisiones se influencia por el perfeccionamiento de la metodología de modelado y el aumento de datos para parametrizarlos. DeAngelis y Diaz (2019) describen las formas en que las decisiones se integran a varios MBA y ofrecen un prospecto sobre el futuro de la modelización de decisiones. El MBA es parcialmente impulsado por la

creciente demanda de los estamentos que toman decisiones para brindar apoyo y comprender los potenciales problemas de acuerdo con su grado de complejidad (Smajgl et al., 2011).

Los MBA son representaciones abstractas de la realidad en los que los objetos a) interactúan entre sí y con el medio ambiente; b) son autónomos (Larrosa, 2016), no hay un control central de su comportamiento, y c) el resultado es numérico. Además, es importante considerar que cuando se modelan individuos las interacciones y los resultados son típicamente discretos y no continuos (Aguilera Ontiveros & Posada Calvo, 2017). Los científicos sociales interesados en la simulación basada en agentes Gilbert y otros, han desarrollado, durante las dos últimas décadas, la siguiente secuencia de etapas para guiar el proceso de investigación (Granderson & Price, 2014). La pregunta de investigación, el diseño, el desarrollo, la verificación, la calibración, el análisis de sensibilidad, la validación, la documentación, la publicación y la replicación. Mientras algunas de estas etapas son comunes a otros métodos de investigación social, otras son más específicas en cuanto a la simulación basada en agentes. La consolidación y la justificación de esta serie de pasos han mejorado el reconocimiento general de la simulación basada en agentes como método de investigación entre los científicos sociales (García-Valdecasas Medina, 2011).

Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) han sido diseñados para recolectar, manejar, analizar, modelar y visualizar información para tomar decisiones basadas en evidencia espacial y/o temporal (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018). Los SIG son herramientas eficientes que permiten integrar múltiples elementos para la gestión y optimización del territorio (González et al., 2004). Las aplicaciones varían desde el uso en la agricultura de precisión (Uva & Campanella, n.d.), en el campo del medio ambiente; administración pública, entre otras (Vázquez, 2017).

El uso de los SIG en proyectos energéticos contribuye con la selección de la ubicación de agentes, infraestructura y recursos de acuerdo con múltiples variables, tales como ambientales, detalles técnicos y rentabilidad (Guerrero Hoyos et al., 2020). Los SIG también se pueden utilizar como un método de apoyo a la decisión espacial. Por ejemplo, en Egipto se seleccionaron sitios apropiados para utilizar la energía solar en la desalinización (Salim, 2012). Así también, en Colombia, mediante los SIG, se pudo evaluar zonas potenciales para generar energía a partir de recursos alternativos (Guerrero Hoyos et al., 2020). Actualmente, los SIG han sido aprovechados en el planeamiento urbano, debido a la necesidad de construir ciudades amigables con el consumo energético. Por ejemplo, el sistema de decisión, a través de los SIG, respalda la toma de decisiones al proponer varias opciones para mejorar la eficiencia energética. Este sistema filtra la información real sobre la categoría de edificios, para incrementar el uso de fuentes de energía renovable (Sztubecka et al., 2020).

El uso de los SIG y los MSE plantea retos de integración como la disponibilidad de datos y los recursos computacionales para tratar la información. Así también el enfoque de los SIG permite localizar de manera óptima las energías renovables variables (ERV) basados en condiciones meteorológicas (Martínez-Gordón et al., 2021). En ciertos casos, debido a la carencia de información geográfica, es necesario el diseño de plataformas para recolectar información espacial. GeoWeb permite inventariar los recursos energéticos autóctonos de cierta zona, así como el potencial energético (Bazurto et al., 2019). Existen plataformas que ayudan a la optimización de los sistemas de energía urbanos. En este contexto, FlexiGIS es una plataforma que proporciona una infraestructura energética urbana que simula el consumo y la generación

de energía, además, realiza una optimización lineal para el despliegue económico de microgeneración y almacenamiento descentralizado en diferentes escenarios energéticos (Mutani & Todeschi, 2019).

La conversión de los desechos en energía es otro de los campos de los SIG. Estos contribuyen a encontrar sitios adecuados para la transformación de energía a partir de los desechos, mediante diferentes procesos como incineración, gasificación, entre otros. Del mismo modo, se puede mantener una base de datos actualizada de la producción de energía, capacidad y la distribución de esta. Además esta información se monitorea constantemente mediante el uso de Web SIG (Janipella et al., 2019). Por ejemplo, mediante QGIS, se analizaron datos sobre la irradiación solar en México, en zonas rurales y urbanas, con el objetivo de conocer el número de paneles fotovoltaicos que se necesita para satisfacer el consumo. Este análisis lo hicieron en las cuatro épocas del año. Los resultados fueron que con cuatro paneles fotovoltaicos se puede dotar de energía a una residencia (Rosas-Flores et al., 2019). En general, el uso de los SIG en el análisis de sistemas energético permite aumentar la precisión del uso de los recursos de acuerdo con su ubicación y variación respecto al tiempo.

Uso de encuestas para caracterización de agentes

El uso de la encuesta es común en los trabajos de investigación dado que es una herramienta muy útil al momento de recopilar información. Mediante los datos que se obtienen de dicha herramienta se logra otorgar atributos a los agentes para su posterior caracterización. El empleo de la encuesta consta de un desarrollo o proceso hasta llegar a proporcionar cualidades a los diversos agentes. En un inicio se procedió a definir las características que poseerán los distintos agentes con base en su comportamiento. Es necesario resaltar que en esta clasificación se agrupó a aquellos que compartan el mismo comportamiento. Por ejemplo, Smajgl et al. (2011) dividen el comportamiento de agricultores y el de las personas que habitan en zonas urbanas. Otra forma de lograr distinguir a los tipos de agentes es reflejando ponderaciones a los datos que se analizaron en la encuesta (Brown & Robinson, 1969). Un aspecto clave en la parte de la encuesta es hacer coincidir la formulación de preguntas con la información que se requiere para el trabajo. Es importante recalcar que se pueden emplear encuestas ya hechas que proporcionan diferentes bases de datos. En consecuencia, una consideración importante es caracterizar agentes que ayuden a reflejar la heterogeneidad de la población que fue estudiada (Jalil-Vega et al., 2020).

Los datos proporcionados por las encuestas fueron la base para caracterizar a los agentes en estudio considerando sus características heterogéneas. De modo que al asignarles atributos a dichos agentes y al clasificarlos se trabaja de forma simplificada, ordenada y sencilla para lograr los objetivos planteados. Hay que recordar que para obtener datos concisos las preguntas de la encuesta deben estar destinadas al estudio que se está llevando a cabo.

Además de la encuesta, se pueden emplear entrevistas, bases de datos gubernamentales, entre otras para caracterizar agentes. En esto influye la caracterización para definir los factores representativos que reflejen diversas cualidades del agente como la condición social, la edad, los ingresos económicos, entre otros (Sachs et al., 2019). Por esta razón, al caracterizar, se puede obtener una hipótesis sobre la forma de vida del agente, su forma de actuar o sus pensamientos. Burg et al. (2021), por ejemplo, requieren información sobre factores claves que afectan la voluntad y la capacidad del agricultor para participar en proyectos socioeconómicos

y no se limita solo a la forma de vida del agente. Asimismo, Karimi y Vaez-Zadeh (2021) estudian el entorno del agente, es decir políticas, reglas, entre otros factores (Brown, 2012). Por lo tanto, es necesario comparar diferentes investigaciones para conocer la manera en que los autores caracterizan a los agentes que estudian, como se detalla en la tabla 1. En esta tabla se presentan diferentes investigaciones referentes a consumo energético.

Tabla 1. Comparación de estudios que utilizan o no encuestas para caracterizar atributos de agentes en el sector energético

Atributos	Caracterización	Usa encuesta	Estudio
Riqueza, edad, cultivos, disponibilidad de fondos, facilidad de acceso.	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño de la población - Diversidad conductual - Posibilidad pragmática de crear muestras representativas 	Sí	(Smajgl et al., 2011)
Cercanía a familiares y amigos, cercanía a espacios naturales, oportunidades recreativas, apariencia atractiva del vecindario, apariencia y distribución de la vivienda, cercanía al trabajo, calidad de escuelas, costos de vivienda, distancia en relación con los centros de compras y las escuelas, tamaño de la comunidad.	<ul style="list-style-type: none"> - Confort social - Apertura - Estética residencial - Escuelas y trabajo - Otros factores 	Sí	(Brown & Robinson, 1969)
Tecnología disponible, información geográfica relevante, datos socioeconómicos, estatus social, edad, ingresos, educación, ocupación, valores fundamentales, actitudes hacia el trabajo, composición familiar. Ingreso y consumo, información de infraestructura de los hogares, información demográfica.	<ul style="list-style-type: none"> - Medios sociales: alto rendimiento, élites educativas ilustradas, pioneros transnacionales, pragmáticos adaptativos, escapistas, clase media, precarios, conservadores establecidos y tradicionalistas - Esta caracterización sirve para definir objetivos (Obj), reglas de búsqueda (SR) y reglas de decisión (DS) - Datos macroeconómicos (información sobre la infraestructura de los hogares, información demográfica y socioeconómica) - Determinan la proporción de la población (PP) representada por un agente, el tipo (TP), la proporción de tecnología (TS) y su presupuesto (B). La infraestructura del hogar también influye en la elección de las reglas de búsqueda 	Sí	(Sachs et al., 2019)
Número de socios (copropietarios), precio de venta de la energía generada, recomendación personal, subsidio de remuneración único, disponibilidad local de cosustrato.	<ul style="list-style-type: none"> - Situación socioeconómica de agricultores - Radio de comunicación (el número de agricultores con los que suelen tener un intercambio, independientemente de su ubicación) - Voluntad para utilizar estiércol externo en una instalación de biogás propia o externa 	Sí	(Burg et al., 2021)

Autónomo (forma independiente en su entorno y en sus interacciones con otros agentes), discreto e identificable, interacción (comunicación e intercambio e influencia de información), adaptación (aprender y adaptar sus comportamientos basados en sus experiencias).	<ul style="list-style-type: none"> - Visión a largo plazo - Incertidumbre - Multidimensionalidad 	No	(Karimi & Vaez-Zadeh, 2021)
Rango de edad, nivel de ingresos, nivel de educación, número de propiedades alquiladas, número de años de experiencia empresarial, comprensión de las medidas de ahorro de energía, fuentes de financiación, medidas de ahorro, importancia de eficiencia y gastos, Probabilidad de modernizar una unidad de ahorro de energía, innovación.	<ul style="list-style-type: none"> - Características sociodemográficas - Características comerciales - Conocimiento de las medidas de ahorro de energía - Experiencia con medidas de ahorro de energía - Actitud hacia las modernizaciones de eficiencia energética - Normas sociales - Eficacia - Características del inversor - Probabilidad de futuras adaptaciones bajo incentivos económicos 	Sí	(Miu & Hawkes, 2020)
Información específica sobre tecnologías, los hogares y las políticas.	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología - Población de hogares - Preferencias 	No	(Chappin et al., 2020)
Nivel de desarrollo, zona climática, número de hogares, fecha, estación, temperatura, ingreso, crecimiento, actividad del operador, dispositivo, calentamiento de agua, enfriamiento, combustible, horas y duración activas, urbano o rural, electrodoméstico.	<ul style="list-style-type: none"> - Regiones - Hogares - Operadores - Dispositivo y combustible 	Sí	(Tian & Chang, 2020)
Condiciones ambientales, energía, precios, criterios de confort, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, sistemas para la eficiencia energética en los edificios.	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo energético - Preferencias - Contexto - Condición climática - Otros 	Sí	(Himeur et al., 2021)
Temperatura habitual de la vivienda, forma de calefacción, uso de la calefacción, tipo de refrigeración, consumo, costos.	<ul style="list-style-type: none"> - Costos de calefacción - Hábitos de calefacción - Edad - Condición de salud 	Sí	(Csutora et al., 2021)

Metodología

Esta investigación se enfoca en el modelo de evaluación integrada (MEI) presentado por Sachs et al. (2019) con la finalidad de comprender la funcionalidad del modelado de sistemas energéticos basado en agentes, denominado MUSE (entorno de simulación de sistemas de energía

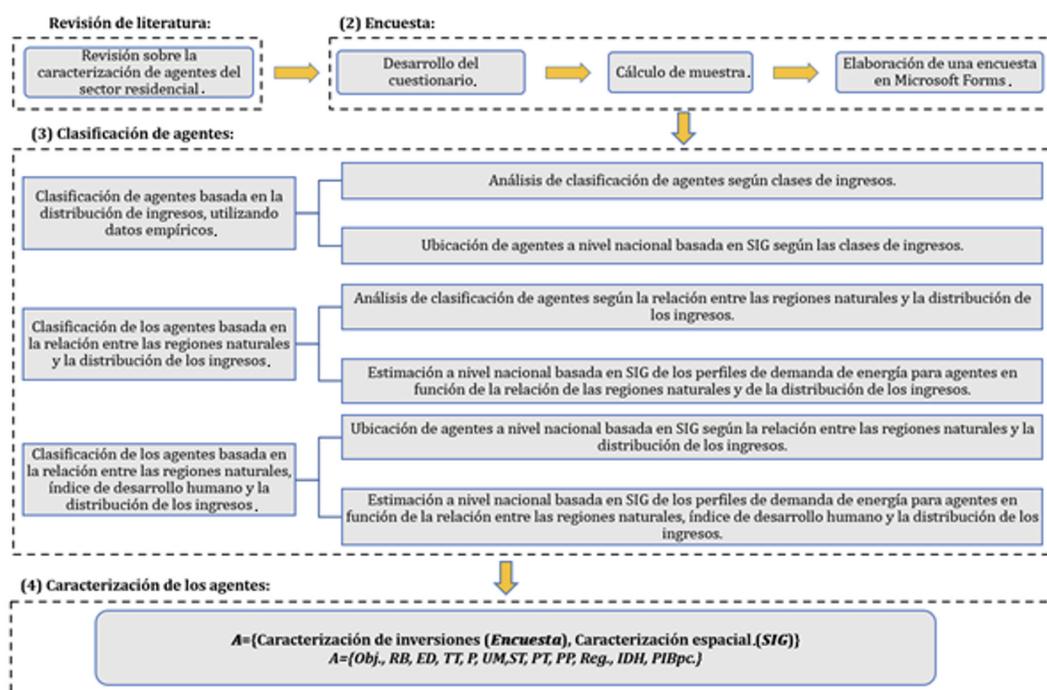
modular). MUSE es un modelo científico de equilibrio parcial, rico en tecnologías, que produce una gama de resultados técnicos, económicos y emisiones. El enfoque principal de MUSE radica en el desarrollo de una descripción precisa de la inversión y la toma de decisiones operativas en cada región geográfica dentro de un sector. Para describir la toma de decisiones, MUSE usa un modelo basado en agentes, el cual tendrá una caracterización de agentes individuales cada uno con sus respectivos atributos. En general, para el análisis del estudio presentado, se separa la metodología en cuatro pasos, como se muestra en la figura 1:

1. Revisión de la literatura sobre caracterización en agentes,
2. Desarrollo de la encuesta,
3. Clasificación y ubicación de agentes basados en encuestas y en los SIG y
4. Caracterización de los agentes.

Diseño de cuestionario y encuesta

En la siguiente sección se presenta un proceso de diseño del cuestionario usado en este estudio. El artículo de Sachs et al. (2019) es fundamental para este diseño, ya que en su estudio presentan un modelo de agentes para las decisiones de inversión en sistemas energéticos del sector residencial. Este es un modelo mejorado en comparación a los demás, porque permite parametrizar los atributos de los agentes mediante la encuesta de manera más óptima. El fin de este cuestionario es capturar varias características del comportamiento del consumidor que influyen en la decisión de inversión. Las preguntas se formularon con base en la experiencia previa de los investigadores del proyecto (que colaboraron con investigaciones de modelados basados en agentes dentro del marco MUSE) junto con los autores de este trabajo.

Figura 1. Metodología de la investigación



Los propósitos de esta encuesta son comprender el estado actual del consumo de energía en los hogares del Ecuador, hacer una evaluación cuantitativa de los sectores y activos participantes y, finalmente, evaluar de forma cualitativa los factores que estaban influyendo en la toma de decisiones de inversión en el sector residencial. El cuestionario consistió en 23 preguntas que permiten ubicar al encuestado espacialmente, específicamente cuando se identifica el nivel económico al que pertenece. Además, se encuestó sobre los tipos de electrodomésticos y el interés de utilizar nuevas tecnologías que aumenten la eficiencia en el consumo de energía en los hogares. Los datos obtenidos de la encuesta se organizaron con el fin de obtener las variables de entrada que sirvieron para responder a los atributos considerados en el MUSE.

Diseño de las preguntas con base en los atributos del MUSE

El principio fundamental de clasificación de agentes utilizado en este artículo es la teoría de la racionalidad limitada abordada por Sachs et al. (2019). En ese estudio se asume que los individuos tienen una capacidad distinta para manejar información del mercado energético y realizar inversiones basadas en sus propias rutas de toma de decisiones y heurísticas. Para describir el comportamiento inversor de la población de una región, se definen varios agentes representativos y se los dota de un determinado conjunto de atributos como se muestran en la ecuación (1) (tabla 2).

$$A = \{\text{Obj.}, \text{RB}, \text{ED}, \text{TT}, \text{P}, \text{UM}, \text{ST}, \text{PT}, \text{PP}\}$$

1

Tabla 2. La definición de los parámetros del agente en el módulo de sector industrial de MUSE (Moya et al., 2020)

Parámetros agente	En la ecuación (1)	Definición
Objetivos	Obj.	Una conexión de aspectos económicos, ambientales y tecnológicos junto con motivaciones personales.
Regla de búsqueda	RB	Una compilación de información sobre tecnologías utilizables y aptitudes de procesamiento de los tomadores de decisiones. La RB guía al espacio de búsqueda (EB) de cada agente que posee todas las tecnologías admisibles delimitado en el sector residencial.
Estrategias de decisión	ED	Hay dos ED: uno y varios objetivos. El ED de objetivo único se enfoca en el objetivo principal; mientras que el ED de varios objetivos utiliza un enfoque de orden de mérito en el que las tecnologías se clasifican de acuerdo con el objetivo del agente. Dentro de MUSE se implementan tres posibles enfoques de ED multiobjetivo.
Tipo de tecnología	TT	Dos tipos de agente: nuevo o modernizado. Existe una diferencia entre modernizar o adquirir una nueva tecnología. Estos dos tipos deben estar relacionados para transferir sus acciones para una posterior renovación de los activos.
Presupuesto	P	Gastos e ingresos máximos que cada agente pueda usar en la inversión de un activo.
Umbral de madurez	UM	Indica la participación de mercado que debe tener una tecnología antes de aparecer en el EB de un agente. Este valor varía según la apertura del agente hacia las nuevas tecnologías.

Stock de tecnologías	ST	Capacidades tecnológicas disponibles en el año base, obtenidas mediante calibración al balance energético y datos relevados.
Propiedad de tecnología	PT	Cantidad de tecnología que un agente en como resultado de la calibración.
Porcentaje de población	PP	Porcentaje de la población representada por la caracterización espacial SIG por agente.

El cuestionario incluyó preguntas cerradas que contienen detalles comunes relacionados con el consumo de energía en el sector residencial basándose en los atributos como se muestra en la tabla 3. En primer lugar, se pidió información acerca de la ubicación geográfica de su residencia (la provincia y el cantón). En segundo lugar, fue necesaria la recolección de datos sobre las características generales (rango de edad, número de integrantes adultos y niños que componen la familia). En tercer lugar, se recolectó información de las características educacionales y económicas (ocupación, nivel de educación, rango de salario mensual). Después se recopiló información sobre los datos de la vivienda (zona de residencia, tipo de vivienda y propiedad). A continuación, se solicitó que proporcionen detalles técnicos sobre los activos existentes relacionados con el calentamiento de espacios, ventilación de espacios, calentamiento de agua y cocción. Posteriormente se requirió información de los detalles comerciales relacionados con los precios del combustible/electricidad consumidos y los impuestos/pagos (facturas de consumo de luz eléctrica y consumo de tanques de gas doméstico). Finalmente, fue necesario recabar información de cuestiones relacionadas con la voluntad y estrategias de decisión al modernizar o adquirir un sistema o equipo de calefacción y ventilación.

Como se puede ver en la tabla 3, para las reglas de búsqueda de tecnologías para la inversión, se pidió a los encuestados que seleccionen una de las alternativas que considerarían al modernizar y adquirir las tecnologías, entre las cuales se considera 1) similar, 2) todas, 3) existente y 4) tipo de combustible. Asimismo, para la toma de decisiones de inversión, se solicitó a los encuestados participantes que indicaran los tres criterios más importantes entre ocho opciones que utilizaban comúnmente para tomar la decisión de invertir en tecnologías energéticas: 1) eficiencia, 2) costos de capital, 3) costo actual equivalente (CAE) con alta tasa de descuento, 4) CAE con tasa de descuento intermedio, 5) CAE con baja tasa de descuento, (6) emisiones, 7) costos fijos y 8) costo de consumo de combustible.

Por último, para las estrategias de decisión de inversión, se solicitó a los encuestados que indicaran una de las tres estrategias de decisión que se utilizan comúnmente: 1) lexicográfico, 2) suma ponderada y 3) épsilon-restricción. Cada parámetro de la definición del agente está delimitado por un grupo de respuestas del cuestionario. Por ejemplo, en la pregunta 23 del cuestionario, se preguntó a los encuestados sobre la toma de su decisión final al adquirir un nuevo sistema o equipo de calefacción y/o ventilación. Como se puede ver en la tabla 3, las preguntas fueron diseñadas para obtener las principales características de los agentes (inversores) con el fin de definir los parámetros que se requieren en la definición del agente en la ecuación (1).

Tabla 3. Caracterización de la agente basada en los hallazgos de la encuesta

Atributo del agente	En Ecu. (1)	Parametrización del agente basado en los agentes	Formulación de preguntas de encuesta
Objetivos	Obj.	- Emisiones -Costo de consumo de combustible -Eficiencia -CAE (costo anual equivalente) con alta tasa de descuento -CAE con tasa de descuento intermedia -CAE con baja tasa de descuento	Pregunta 21 Pregunta 22
Regla de búsqueda	RB	-Similar -Tipo de combustible -Existente -Todas	Pregunta 19
Estrategia de decisión	ED	-Lexicográfico* -Suma ponderada** -Épsilon-restricción***	Pregunta 23
Stock de tecnologías	ST	Se consideran las tecnologías actuales existentes	Pregunta 13 Pregunta 14 Pregunta 15 Pregunta 16
Porcentaje de la población	PP	Este valor representa el total de personas que se encuentran en un cierto sector, clasificados en grupos mediante un análisis espacial	SIG

* El agente selecciona entre sistemas similares al mejor según el primer criterio, y luego toma una decisión final entre estos sistemas en función del segundo y tercer criterio.

** El agente pondera entre todos los tres criterios por igual al tomar una decisión.

*** El agente selecciona el sistema con la mejor calificación basado únicamente en el primer criterio.

Cálculo de la muestra

Para el diseño muestral de la encuesta, se utilizó técnicas de muestreo probabilístico de población finita a fin de garantizar la representatividad geográfica y de los dominios de estudio de la encuesta, y para calcular los factores de expansión y los errores asociados al muestreo. En esta encuesta participaron hombres y mujeres, mayores de 18 años, a nivel nacional. El tamaño de muestra se calculó en función a los parámetros que se muestran en la tabla 4. El tamaño de la población o universo se estableció según el contador poblacional del Ecuador que presenta el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2014), en el cual consta que existen 17 510 643 habitantes en el Ecuador.

Tabla 4. Parámetros de cálculo de muestra

Parámetro	Símbolo	Valor
Tamaño de la población o universo	N	17 510 643
Probabilidades con las que se presenta el fenómeno	p/q	50 %/50 %
Valor crítico correspondiente al nivel de confianza elegido	Z	1.96
Error de estimación máximo aceptado	e	4 %

El tamaño de muestra depende de tres aspectos:

1. Error permitido
2. Nivel de confianza estimado
3. Carácter finito de la población

La fórmula general para determinar el tamaño de muestra es la siguiente:

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

$$n = \frac{(17\ 510\ 643) * (1.96)^2 * (0.5) * (0.5)}{(0.04)^2 * (17\ 510\ 643 - 1) + (1.96)^2 * (0.5) * (0.5)}$$

$$n = 600$$

En la distribución de las 600 encuestas de la muestra se considera tres aspectos principales:

1. El primer parámetro son las cuatro regiones naturales del Ecuador, ya que cada una tiene una característica climática distinta relacionada directamente con la demanda de energía.
2. El segundo parámetro que se considera es la población en vista de que es un impulsor demográfico importante de la demanda energética.
3. El tercer parámetro que se considera es el salario mínimo mensual relacionado directamente con el nivel socioeconómico de cada individuo concerniente al producto interno bruto per cápita.

Caracterización de agentes

El modelado basado en agentes se singulariza por estar conformado por dos fragmentos principales como se muestra en la ecuación (2): la parte de caracterización espacial y, la otra, la caracterización de inversiones basada en la encuesta (Moya, 2020). Los SIG permiten caracterizar espacialmente en varios escenarios para el modelado basado en agentes. La encuesta permite caracterizar los atributos de inversión en el sector residencial del Ecuador, con base en los impulsores demográficos y socioeconómicos de la demanda de energía. Estos impulsores son la población, el producto interno bruto per cápita y el índice de desarrollo humano.

$$A = \{\text{Caracterización espacial (SIG); Caracterización de inversiones (Encuesta)}\} \quad (2)$$

Parametrización de agentes

La caracterización espacial de los agentes se enfoca en la estratificación espacial del producto interno bruto per cápita (PIBpc), debido a que es considerada como principal impulsor de demanda de energía. El PIBpc se estratifica en cinco regiones espaciales basadas en los niveles

socioeconómicos presentados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos ([INEC] 2014). Según el informe del INEC, los niveles socioeconómicos se categorizan en cinco estratos: nivel A, nivel B, nivel C+, estrato C- y el nivel D. El informe contiene un análisis comparativo con los siguientes parámetros: características de las viviendas, bienes, tecnología, hábitos de consumo, educación y economía entre los cinco estratos socioeconómicos INEC (2014).

En su investigación, Heredia (2016) relaciona y estratifica los niveles socioeconómicos con el producto interno bruto per cápita. Esta investigación permite parametrizar y relacionar las regiones espaciales con los parámetros de la encuesta y encontrar el porcentaje de población de cada sector. La población que pertenece a la clase de ingreso Q1 percibe un ingreso mensual per cápita mayor a 3000 \$; la de la clase de ingreso Q2, un rango de ingreso mensual per cápita entre 1000-3000 \$; la de la clase de ingreso Q3, un salario mensual per cápita entre 500-1000 \$; la de la clase de ingreso Q4, un salario mensual per cápita entre 200-500 \$, y, finalmente, la de la clase de ingreso Q5, percibe un salario mensual per cápita menor a 200 \$.

Caracterización espacial de agentes

Los SIG son herramientas de análisis que presentan la contingencia de establecer las conexiones espaciales de los fenómenos de estudio. Una buena parte del análisis geográfico se realiza sobre capas ráster. La metodología para la caracterización espacial de agentes se basa en el método de modelado SIG de arriba hacia abajo. El Ecuador presenta una base de datos global de censos poblacionales emitida por el INEC 2014 y datos del producto interno bruto emitidos por el Banco Central del Ecuador, entre 2010-2020, en resolución anual y una resolución espacial por cantones en formato csv. De igual forma, el Ecuador presenta datos geográficos que delimitan su territorio mediante un modelo vectorial conocido como *shapefile*. Estos dos conjuntos de datos son procesados y convertidos en una sola base de datos geoespacial *shapefile*. Estos datos geoespaciales son procesados y desagregados en recuentos basados en celdas de cuadrícula o píxeles a una resolución espacial de 1 km².

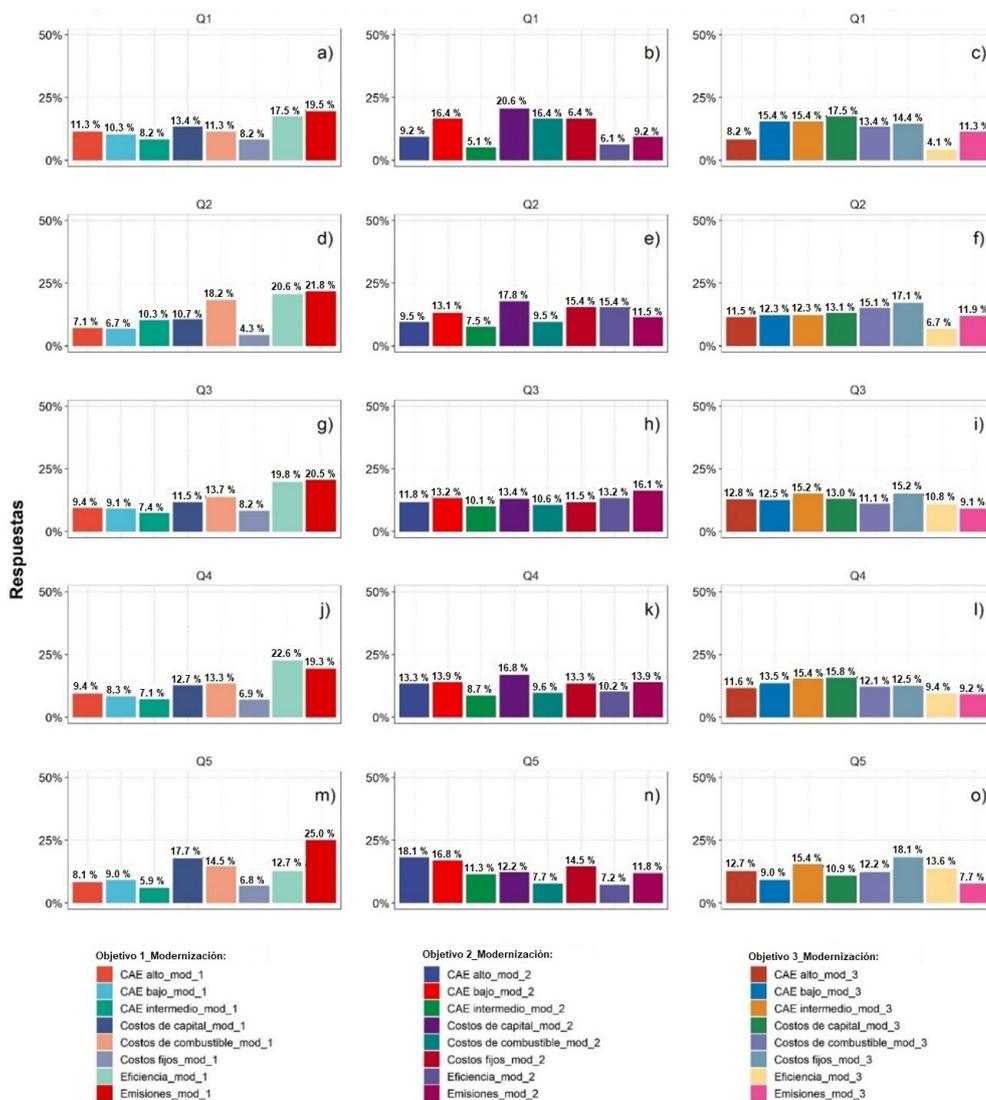
El procesamiento de los datos geoespaciales se enfoca en un modelado que tiene una capa de interconexión. Esta capa utiliza el aprendizaje automático conocido como *random forests*. Stevens et al. (2015) explican que el *random forests* es un método que ayuda a determinar la redistribución disimétrica de datos de conteo poblacional y producto interno bruto geoespaciales. Posteriormente, se realizó una relación entre el rasterizado de la población y el producto interno bruto para calcular el producto interno bruto per cápita (PIBpc). Mediante una reclasificación de ráster, se recategoriza el PIBpc en cinco clases Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5 relacionadas a las cinco clases de ingresos que presenta el Ecuador, basado en la estratificación del PIBpc en cinco regiones espaciales, con base en las clases socioeconómicas que constan en el informe del INEC.

Los parámetros caracterizados son clase A, clase B, clase C- y la clase E que en esta investigación se denominarán clases Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5, respectivamente. El ráster recategorizado se lo convirtió en un modelo vectorial de extensión *shapefile*. El modelo vectorial *shapefile* de las clases de ingreso permite realizar un corte en el rasterizado de la población para determinar el porcentaje de población de cada clase de agente.

Resultados

En la figura 2 se muestra la distribución porcentual de los objetivos del agente a la hora de modernizar sistemas o tecnologías para calefacción de espacios, ventilación de espacios, calentamiento de agua, iluminación y/o electrodomésticos. En primer lugar, en la figura 2 (a, d, g, j, m) constan los objetivos principales distribuidos para las cinco clases de ingresos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1, Q2, Q3 y Q5 mencionan que consideran como primer objetivo para tomar una decisión cuando modernizan sus equipos las emisiones (Emisiones_mod_1) con una aceptación mayoritaria del 19.59 %, 21.83 %, 20.53 % y 25 %, respectivamente, con respecto a los demás objetivos. Se puede observar que la mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q4 acoge la eficiencia (Eficiencia_mod_1) como objetivo primordial con una aceptación mayoritaria del 22.63 % con respecto a los demás objetivos.

Figura 2. Objetivos del agente, caracterizado por clases de ingresos, a la hora de modernizar sistemas o tecnologías



En segundo lugar, en la figura 2 (b, e, h, k, n) se presentan los objetivos secundarios distribuidos en cinco clases de ingresos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1, Q2 y Q4 menciona que considera como primer objetivo los costos de capital (Costos de capital_mod_2) con una aceptación mayoritaria del 20.63 %, 17.86 % y 16.83 %, respectivamente, con respecto a los demás objetivos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q3 acoge a los costos de emisiones (Emisiones_mod_2) como objetivo secundario con una aceptación mayoritaria del 16.18 % con respecto a los demás objetivos. En tanto que la mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q5 acoge al costo anual equivalente alto (CAE alto_mod_2) como objetivo secundario con una aceptación mayoritaria del 18.18 % con respecto a los demás objetivos.

Finalmente, en la figura 2 (c, f, i, l, o) se presenta los objetivos terciarios. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1 menciona que considera como primer objetivo los costos de capital (Costos de capital_mod_3) con una aceptación mayoritaria del 17.53 % con respecto a los demás objetivos. Mientras que la mayor parte de la población que pertenecen a la clase de ingreso Q2 y Q5 prefiere los costos fijos (Costos fijos_mod_3) con una aceptación mayoritaria del 17.06 % y 18.18 %, respectivamente, con respecto a los demás objetivos. En tanto que la mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q3 prefiere al costo anual equivalente intermedio (CAE intermedio_mod_3) con una aceptación mayoritaria del 15.22 % con respecto a los demás objetivos. En cambio, la mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q4 prefiere los costos de capital (Costos de capital_mod_3) con una aceptación mayoritaria del 15.86 % con respecto a los demás objetivos.

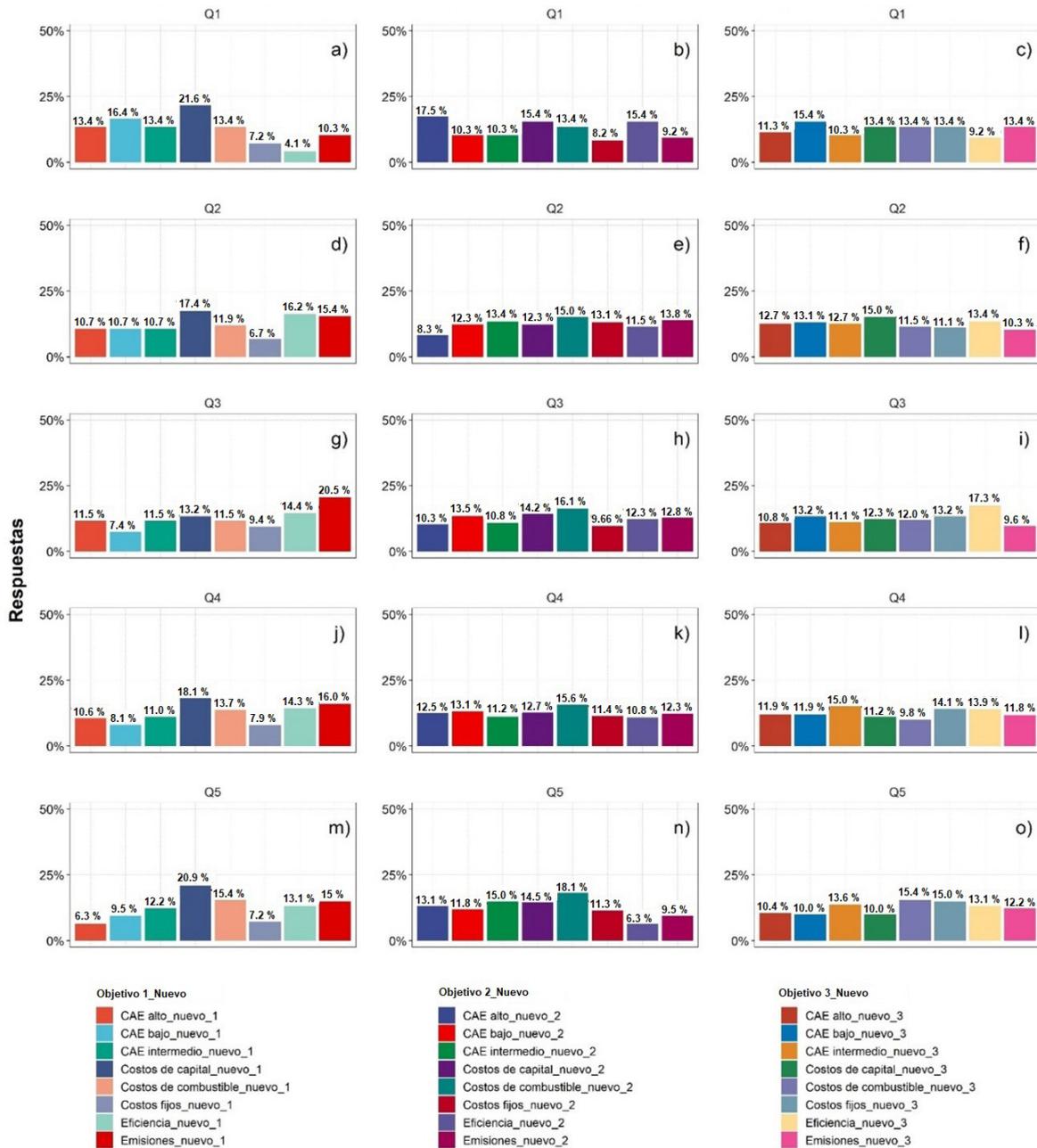
La figura 3 muestra la distribución porcentual de los objetivos del agente a la hora de adquirir nuevos sistemas o tecnologías para calefacción de espacios, ventilación de espacios, calentamiento de agua, iluminación y/o electrodomésticos. En primer lugar, en la figura 3 (a, d, g, j, m) se presentan los objetivos principales distribuidos en cinco clases de ingresos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1, Q2, Q4 y Q5 menciona que considera como primer objetivo los costos de capital (Costos de capital_nuevo_1) con una aceptación mayoritaria del 21.65 %, 17.46 %, 18.18 % y 20.91 %, respectivamente, con respecto a los demás objetivos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q3 acoge al costo de emisiones (Emisiones_nuevo_1) como objetivo primordial con una aceptación mayoritaria del 20.53 % con respecto a los demás objetivos.

En segundo lugar, en la figura 3 (b, e, h, k, n) se presentan los objetivos secundarios distribuidos en cinco clases de ingresos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1 menciona que considera como primer objetivo el costo anual equivalente alto (CAE alto_nuevo_2) con una aceptación mayoritaria del 17.53 % con respecto a los demás objetivos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q2, Q3, Q4 y Q5 acoge a los costos de combustible (Costos de combustible_nuevo_2) como objetivo secundario con una aceptación mayoritaria del 15.08 %, 16.18 %, 15.67 % y 18.18 %, respectivamente, respecto a los demás objetivos.

Finalmente, en la figura 3 (c, f, i, l, o) se presentan los objetivos terciarios. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q1 menciona que considera como primer objetivo el costo anual equivalente bajo (CAE bajo_nuevo_3) con una aceptación mayoritaria del 15.46 % con respecto a los demás objetivos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q2 prefiere a los costos de capital (Costos de capital_nuevo_3) con una aceptación mayoritaria del 15.08 % con respecto a los demás objetivos. En tanto que la mayor parte de la po-

blación que pertenece a la clase de ingreso Q3 prefiere la eficiencia (Eficiencia_nuevo_3) con una aceptación mayoritaria del 17.39 % respecto a los demás objetivos. En cambio, la mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q4 prefiere el costo anual equivalente intermedio (CAE intermedio_nuevo_3) con una aceptación mayoritaria del 15.09 % respecto a los demás objetivos. La mayor parte de la población que pertenece a la clase de ingreso Q5 prefiere los costos de combustible (Costos de combustible_nuevo_3) con una aceptación mayoritaria del 15.45 % con respecto a los demás objetivos. Los resultados de la encuesta se muestran en el anexo

Figura 3. Objetivos del agente, caracterizado por clases de ingresos, a la hora de adquirir nuevos sistemas o tecnologías



La figura 4 representa la regla de búsqueda que considera un agente al adquirir o modernizar sistemas o tecnologías para calefacción de espacios, ventilación de espacios, calentamiento de agua, iluminación y/o electrodomésticos. La regla de búsqueda permite a los usuarios reducir el espacio de búsqueda de tecnologías a aquellas que un agente puede considerar. En primer lugar, en la figura 4 (a, b, d) se interpreta que la mayor parte de la población de las clases de ingresos Q1, Q2 y Q4 considera todas las tecnologías disponibles en su espacio de búsqueda antes de hacer la inversión, con una aceptación del 32.99 %, 30.95 % y 28.24 %, respectivamente, con respecto a las demás reglas de búsqueda. En segundo lugar, en la figura 4 (c, e) se interpreta que la mayor parte de la población de las clases de ingreso Q3 y Q5 considera tecnologías existentes en su espacio de búsqueda antes de su inversión, con una aceptación mayoritaria del 29.47 % y 29.09 %, respectivamente, con respecto a las demás reglas de búsqueda.

Figura 4. Regla de búsqueda del agente, caracterizado por clases de ingresos, al adquirir o modernizar sistemas o tecnologías

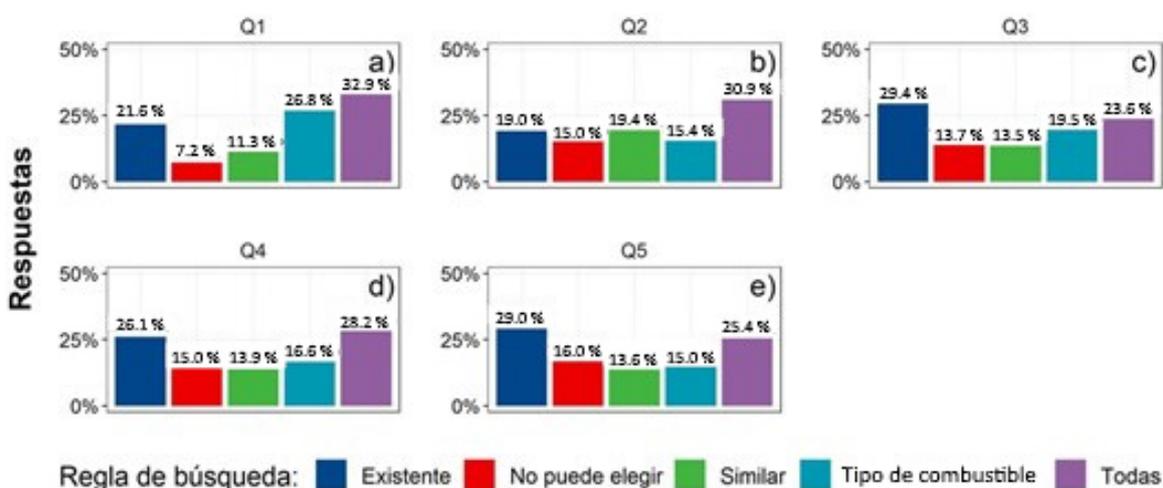
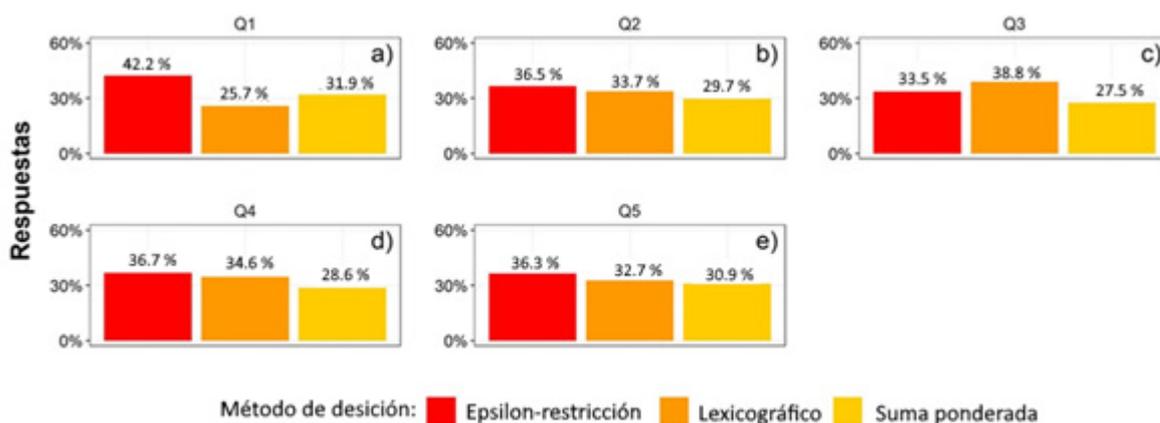


Figura 5. Método de decisión del agente, caracterizado por clases de ingresos, al adquirir o modernizar sistemas o tecnologías



En la figura 5 se representan los métodos de decisión del agente al adquirir o modernizar sistemas o tecnologías para calefacción de espacios, ventilación de espacios, calentamiento de agua, iluminación y/o electrodomésticos. En primer lugar, en la figura 5 (a, b, d, e) se interpreta que la mayor parte de la población de las clases de ingresos Q1, Q2, Q4 y Q5 considera el método del épsilon-restricción antes de su inversión, con una aceptación del 42.27 %, 36.51 %, 36.75 % y 36.36 %, respectivamente, con respecto a los demás métodos de decisión.

La estrategia épsilon-restricción es un método de comparación que garantiza que primero se seleccionan las tecnologías que siguen las restricciones de los objetivos 2 y superiores antes de clasificarlas realmente utilizando el objetivo 1. En segundo lugar, en la figura 5 (c) se puede interpretar que la mayor parte de la población de las clases de ingreso Q3 consideran el método lexicográfico antes de su inversión, con una aceptación del 38.89 % respecto a los demás métodos de decisión.

Tabla 5. Caracterización de agentes

Agente	Objetivo 1	Objetivo 2	Objetivo 3	Regla de búsqueda	Estrategias de decisión	Tipo de tecnología	Presupuesto (MMUS\$/PJ) basado en (Moya, 2020)	Porcentaje de población (%) basado en SIG
Q1	Emisiones	Costos de capital	CAE bajo	Todas	Épsilon-restricción	Mantenimiento	302	1.33
Q2	Emisiones	Costos de capital	Costos fijos	Todas	Épsilon-restricción	Mantenimiento	78	4.74
Q3	Emisiones	CAE bajo	Costos fijos	Existente	Lexicográfico	Mantenimiento	33.8	10.38
Q4	Eficiencia	Costos de capital	CAE intermedio	Todas	Épsilon-restricción	Mantenimiento	18.4	33.03
Q5	Emisiones	CAE alto	Costos fijos	Existente	Épsilon-restricción	Mantenimiento	6.4	50.52
Q1'	Costos de capital	CAE alto	Costo de consumo de combustible	Todas	Épsilon-restricción	Nuevo	302	1.33
Q2'	Costos de capital	Costo de consumo de combustible	Eficiencia	Todas	Épsilon-restricción	Nuevo	78.5	4.74
Q3'	Emisiones	Costo de consumo de combustible	Eficiencia	Existente	Lexicográfico	Nuevo	33.76	10.38
Q4'	Costos de capital	Costo de consumo de combustible	CAE intermedio	Todas	Épsilon-restricción	Nuevo	18.38	33.03
Q5'	Costos de capital	Costo de consumo de combustible	Costos fijos	Existente	Épsilon-restricción	Nuevo	6.4	50.52

La tabla 5 muestra la caracterización de los agentes. Se plantean cinco agentes: los agentes Q1- Q1' se conforman por el 1.33 % de la población total. Estos tienen acceso al presupuesto más alto, y considera todas las tecnologías disponibles incluidas las de mayor innovación. Por una parte, el agente Q1 busca reducir el impacto ambiental mediante la modernización/mantenimiento y el funcionamiento (es decir, uso de combustible/electricidad, cargos mensuales, mantenimiento) del sistema o tecnología con el costo más bajo disponible. Por otra parte, el agente Q1' considera adquirir una tecnología nueva que tenga un costo de tecnología y funcionamiento más bajo y no le importa que el costo de instalación sea alto. Por último, el agente Q1

y Q1', para tomar una decisión de inversión, seleccionan todos los sistemas o equipos similares considerando el mejor en su primer criterio, y luego toman una decisión final entre estos sistemas con base en su segundo y tercer criterio.

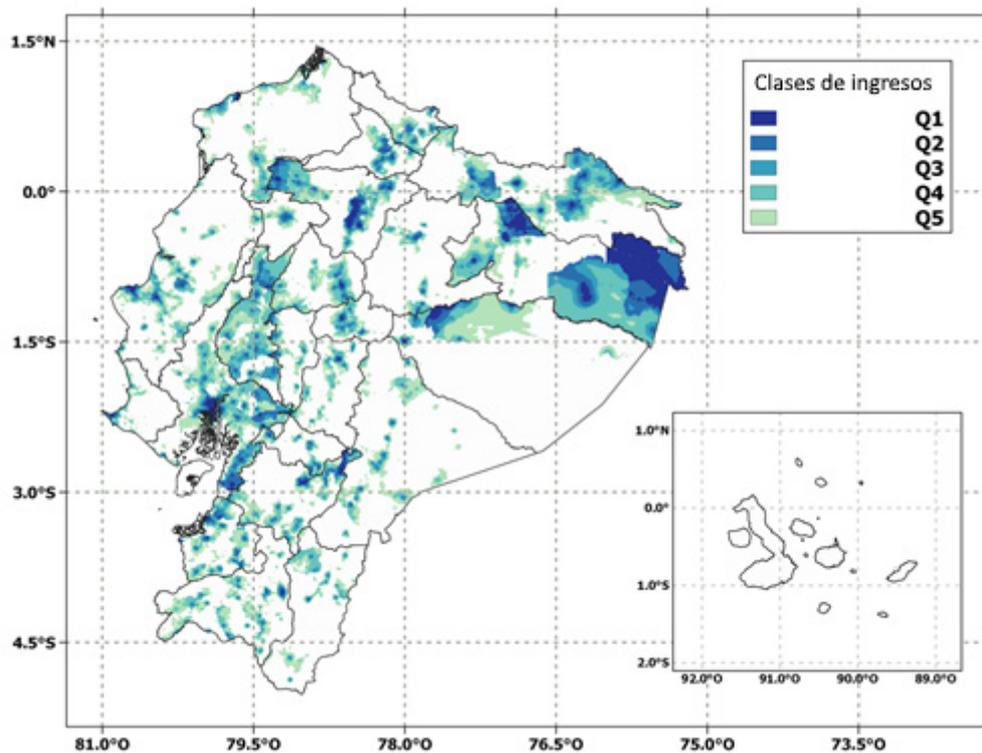
Los agentes Q2 y Q2' conforman el 4.74 % de la población total. Estos disponen de un presupuesto de 78.5 MM\$/PJ y consideran todas las tecnologías disponibles incluidas las de mayor innovación. Por una parte, el agente Q2 busca reducir el impacto ambiental mediante la modernización, considerando sus costos adicionales (es decir, intereses pagados sobre la inversión inicial si se trata de un préstamo, seguro o depreciación) del sistema o tecnología con el costo más bajo disponible. Por otra parte, el agente Q2' considera la adquisición de una tecnología nueva que tenga un costo de tecnología y funcionamiento más bajo, para mejorar la eficiencia de la tecnología que tenía. Por último, los agentes Q2 y Q2' para tomar una decisión de inversión, seleccionan todos los sistemas o equipos similares considerando el mejor en su primer criterio, y luego toman una decisión final entre estos sistemas con base en su segundo y tercer criterio.

Los agentes Q3 y Q3' conforman el 10.38 % de la población total. Estos cuentan con un presupuesto de 33.76 MM\$/PJ, y consideran la inversión de tecnologías que ya han utilizado antes, sea para la modernización o para adquisición nueva. Por una parte, el agente Q3 busca reducir el impacto ambiental mediante el funcionamiento de la modernización del sistema o tecnología con el costo más bajo disponible, considerando sus costos adicionales. Por otra parte, el agente Q3' busca reducir el impacto ambiental mediante el costo de funcionamiento más bajo de la tecnología por adquirir, para mejorar la eficiencia de la tecnología que tenía. Por último, los agente Q3 y Q3', para tomar una decisión de inversión, toman en cuenta todos sus tres criterios por igual al tomar la decisión final.

Los agentes Q4 y Q4' conforman el 33.03 % de la población total y cuentan con un presupuesto de 18.38 MM\$/PJ. Estos agentes consideran la inversión en nuevas opciones de tecnologías para modernización, incluyendo aquellas que no hayan visto funcionar antes y sean más innovadoras. Por una parte, el agente Q4 busca mejorar la eficiencia de su tecnología actual, mediante la modernización, considerando la instalación del sistema o tecnología con un costo intermedio disponible. Por otra parte, el agente Q4' considera adquirir una tecnología nueva que tenga un costo de tecnología y funcionamiento más bajo, y no le importa que el costo de instalación sea alto. Por último, los agentes Q4 y Q4', para tomar una decisión de inversión, seleccionan todos los sistemas o equipos similares considerando el mejor en su primer criterio, y luego toman una decisión final entre estos sistemas con base en su segundo y tercer criterio.

Los agentes Q5 y Q5' conforman la mayor parte de la población con el 50.52 % de la población total y disponen del presupuesto más bajo al 6.4 MM\$/PJ. Estos agentes consideran una inversión de tecnologías que ya han utilizado o visto antes para la modernización o adquisición nueva. Por una parte, el agente Q5 busca reducir el impacto ambiental mediante la modernización del sistema o tecnología con el costo más bajo disponible, considerando sus costos adicionales. Por otra parte, el agente Q5' considera adquirir una tecnología nueva que tenga un costo de tecnología y funcionamiento más bajo, considerando sus costos adicionales. Por último, los agentes Q5 y Q5', para tomar una decisión de inversión, toman en cuenta todos sus tres criterios por igual al tomar la decisión final.

Figura 6. Localización de los agentes de consumo energético en el sector residencial a nivel nacional



En la figura 6 se puede ver la localización espacial de los agentes Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5 en el territorio ecuatoriano. Claramente, se aprecia que los agentes de mayores ingresos se encuentran en las ciudades de Guayaquil y Quito, y en la provincia de Orellana donde se concentra la mayor actividad petrolera del país. Se puede observar que los agentes de menores ingresos, Q5, se encuentran distribuidos a lo largo del territorio. Esta localización espacial de los agentes complementa la información obtenida en la encuesta y permite tener un mayor entendimiento de la localización de las acciones políticas respecto al abastecimiento de energía en el sector residencial del Ecuador.

El uso de modelación basada en agentes para el sector energético se está convirtiendo en una herramienta popular. Sin embargo, este tipo de modelación aún se encuentra en desarrollo. Sachs et al. (2019) son quienes, tomando el Reino Unido como caso de estudio, han desarrollado la primera investigación que aborda la modelación basada en agentes para evaluar la transición energética del sector residencial. En comparación con este estudio, la principal limitación de Sachs et al. (2019) es la carencia de una encuesta para obtener datos de fuente primaria, así como el uso de los SIG para ubicar espacialmente a los agentes. Otro estudio que usa modelación basada en agentes para el sector energético es presentado por Moya (2020). Al comparar este estudio con el de Moya (2020), se puede ver que el uso de información primaria es la principal característica para definir los agentes, aunque Moya (2020) aplica su estudio en el sector industrial. En general, este artículo presenta la primera investigación que se realiza en el Ecuador y en América Latina, la cual permite contribuir a un mejor entendimiento de la heterogeneidad de los consumidores del sector energético residencial.

Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se ha utilizado una encuesta nacional y los SIG para caracterizar a los agentes de consumo energético en el sector residencial del Ecuador. La caracterización espacial se basa en los SIG de la ubicación espacial de las clases socioeconómicas e impulsores de demanda de energía, categorías que sirven para la modelación de escenarios futuros de consumo.

Se han identificado cinco agentes basados en la clasificación socioeconómica del INEC, para establecer el porcentaje de población para cada agente que se puede implementar en una simulación. La metodología aplicada ha permitido estimar la ubicación de los agentes de consumo mediante el uso de los SIG. Los resultados permiten caracterizar y parametrizar agentes con base en una serie de atributos que se pueden utilizar cuando se hace una planificación energética, para cuantificar la toma de decisiones respecto a la compra o al mantenimiento de sistemas o equipos energéticos del hogar. En futuras investigaciones se podrán utilizar los resultados para profundizar en la modelación de instrumentos de política energética a lo largo del país considerando la heterogeneidad de los agentes en el sector residencial.

Referencias

- Andersen, J. (2015). *Modelling and optimisation of renewable energy systems*. (Doctoral dissertation, tesis doctoral, Aarhus University, Dinamarca, < http://pure.au.dk/portal/files/86807925/PhD_thesis_Jeanne_Andersen.pdf>[21/3/2016]).
- Aguilera Ontiveros, A., & Posada Calvo, M.. (2017). *Introducción al modelado basado en agentes: Una aproximación desde Netlogo*. El Colegio de San Luis.
- Bazurto, J. J. B., Falcones, V. A. M., Gámez, M. R., & Arvelo, M. G. V. (2019). Geographic information system for Manabí sustainable development. *International Research Journal of Management, IT and Social Sciences*, 6(6), 17–28. <https://doi.org/10.21744/irjmis.v6n6.741>
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 [Supplement 3], 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Brown, D. (2012). *Using a social survey to define preferences for residential locations in an agent-based model*. Brookings. <https://brook.gs/3BhMPBR>
- Brown, D. G., & Robinson, D. T. (1969). Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl. *Ecology and Society Volumen 11 artículo*. 46
- Burg, V., Troitzsch, K. G., Akyol, D., Baier, U., Hellweg, S., & Thees, O. (2021). Farmer's willingness to adopt private and collective biogas facilities: An agent-based modeling approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105400. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105400>
- Cantergiani, C., & Gómez Delgado, M. (2016). Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 70(70). <https://doi.org/10.21138/bage.2171>
- Cevallos-Sierra, J., & Ramos-Martin, J. (2018). Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (part 1), 1154–1165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>
- Cepeda Susatama, K. D., Durango Ruíz, K. A., & Bohórquez Arévalo, L. (2017). Modelación y simulación basada en agentes como alternativa para el estudio de las organizaciones empresariales. *Ingeniería Solidaria*, 13(22), 103–119. <https://doi.org/10.16925/in.v13i22.1838>
- Chappin, É. J. L., Nikolic, I., & Yorke-Smith, N. (2020). Agent-based modelling of the social dynamics of energy end use. In *Energy and Behaviour: Towards a low carbon future* (pp. 321–351). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818567-4.00029-6>

- Clarke, L., Eom, J., Marten, E. H., Horowitz, R., Kyle, P., Link, R., Mignone, B. K., Mundra, A., & Zhou, Y. (2018). Effects of long-term climate change on global building energy expenditures. *Energy Economics*, 72, 667–677. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.01.003>
- Csutora, M., Zsoka, A., & Harangozo, G. (2021). The grounded survey: An integrative mixed method for scrutinizing household energy behavior. *Ecological Economics*, 182, 106907. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106907>
- Daniels, D. (2017, agosto 31). *Overview of the National Energy Modeling System (NEMS)*. Presented at the University of Bergamo/Georgia Tech Environment and Sustainability Workshop. <https://b.gatech.edu/3Jniogl>
- DeAngelis, D. L., & Diaz, S. G. (2019). Decision-making in agent-based modeling: A current review and future prospectus. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6(Jan), 237. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00237>
- Deller, D. (2018). Energy affordability in the EU: The risks of metric driven policies. *Energy Policy*, 119, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.033>
- E3MLab. (2014). *TREMOVE Transport Model*. <http://www.e3mlab.eu>
- Farmer, J. D., & Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460(7256), 685–686. <https://doi.org/10.1038/460685a>
- Fragkos, P., Fragkiadakis, K., Paroussos, L., Pierfederici, R., Vishwanathan, S. S., Köberle, A. C., Iyer, G., He, C.-M., & Oshiro, K. (2018). Coupling national and global models to explore policy impacts of NDCs. *Energy Policy*, 118, 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.002>
- García-Gusano, D., Suárez-Botero, J., & Dufour, J. (2018). Long-term modelling and assessment of the energy-economy decoupling in Spain. *Energy*, 151, 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.102>
- García-Valdecasas Medina, J. I. (2011). La simulación basada en agentes: Una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 136(136), 91–110. <https://doi.org/10.5477/cis/reis.136.91>
- Gardumi, F., Shivakumar, A., Morrison, R., Taliotis, C., Broad, O., Beltramo, A., Sridharan, V., Howells, M., Hörsch, J., Niet, T., Almulla, Y., Ramos, E., Burandt, T., Balderrama, G. P., Pinto de Moura, G. N., Zepeda, E., & Alfstad, T. (2018). From the development of an open-source energy modelling tool to its application and the creation of communities of practice: The example of OSeMOSYS. *Energy Strategy Reviews*, 20, 209–228. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.005>
- Geng, Y., Zhao, H., Liu, Z., Xue, B., Fujita, T., & Xi, F. (2013). Exploring driving factors of energy-related CO₂ emissions in Chinese provinces: A case of Liaoning. *Energy Policy*, 60, 820–826. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.054>
- Geog.leeds. (n.d). *Agent Based Modelling: Introduction*. Recuperado en julio 11, 2021, de <http://www.geog.leeds.ac.uk/courses/other/crime/abm/general-modelling/index.html>
- González, R., Treviño, E., Aguirre, O., Jiménez, J., Cantú, I., & Foroughbakhch R. (2004). Rodalización mediante sistemas de información geográfica y sensores remotos. *Investigaciones geográficas*, 53, 39–57. <https://bit.ly/3uZKxX5>
- Guerrero Hoyos, B. G., Vélez Macías, F. D. J., & Morales Quintero, D. E. (2020). Energía eólica y territorio: Sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.eets>
- Hall, L. M. H., & Buckley, A. R. (2016). A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 169, 607–628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- Herbst, A., Toro, F., Reitze, F., & Jochem, E. (2012). Introduction to energy systems modelling. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 148(2), 111–135. <https://doi.org/10.1007/BF03399363>
- Heredia, G. (2016). *Análisis socioeconómico de la implementación de un servicio de microseguros para familia de bajos recursos en la ciudad de Quito a través de las organizaciones de la economía popular y solidaria* [Universidad Internacional del Ecuador]. Repositorio UIDE. <https://bit.ly/3uFZsFz>

- Himeur, Y., Alsalemi, A., Al-Kababji, A., Bensaali, F., Amira, A., Sardianos, C., Dimitrakopoulos, G., & Varlamis, I. (2021). A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects. *Information Fusion*, 72, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.02.002>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2014). *Sistema Nacional de Información*. <https://sni.gob.ec/inicio>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). *Encuesta de estratificación del nivel socioeconómico NSE 2011*. <https://bit.ly/3BeZ1mW>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014 mitigation of climate change. In *Climate change 2014 mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CB09781107415416>
- Jalil-Vega, F., García Kerdan, I., & Hawkes, A. D. (2020). Spatially-resolved urban energy systems model to study decarbonisation pathways for energy services in cities. *Applied Energy*, 262, 114445. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114445>
- Janipella, R., Gupta, V., & Moharir, R. V. (2019). Application of geographic information system in energy utilization. In S. Kumar, R. Kumar & A. Pandey (Eds.), *Current developments in biotechnology and bioengineering: Waste treatment processes for energy generation* (pp. 143–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00008-7>
- Karimi, M. J., & Vaez-Zadeh, S. (2021). An agent-based model for electric energy policy assessment. *Electric Power Systems Research*, 192, 106903. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106903>
- Larrosa, J. M. (2016). Agentes computacionales y análisis económico. *Revista de Economía Institucional*, 18 (34), 87–113. <https://bit.ly/3BixyAF>
- Liang, S., & Zhang, T. (2011). What is driving CO₂ emissions in a typical manufacturing center of South China? The case of Jiangsu Province. *Energy Policy*, 39(11), 7078–7083. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.014>
- Lind, A., & Espegren, K. (2017). The use of energy system models for analysing the transition to low-carbon cities: The case of Oslo. *Energy Strategy Reviews*, 15, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.01.001>
- Ma, J., & Cheng, J. C. P. (2016). Estimation of the building energy use intensity in the urban scale by integrating GIS and big data technology. *Applied Energy*, 183, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.079>
- Martínez-Gordón, R., Morales-España, G., Sijm, J., & Faaij, A. P. C. (2021). A review of the role of spatial resolution in energy systems modelling: Lessons learned and applicability to the North Sea region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110857. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110857>
- Mastrucci, A., Pérez-López, P., Benetto, E., Leopold, U., & Blanc, I. (2017). Global sensitivity analysis as a support for the generation of simplified building stock energy models. *Energy and Buildings*, 149, 368–383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.022>
- Miu, L., & Hawkes, A. D. (2020). Private landlords and energy efficiency: Evidence for policymakers from a large-scale study in the United Kingdom. *Energy Policy*, 142, 111446. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111446>
- Moya, D. (2020). *Global decarbonisation pathways of the residential sector using a Geographical Information Systems approach and Agent-based modelling* [Tesis doctoral no publicada] (Imperial College London).
- Moya, D., Budinis, S., Giarola, S., & Hawkes, A. (2020). Agent-based scenarios comparison for assessing fuel-switching investment in long-term energy transitions of the India's industry sector. *Applied Energy*, 274, 115295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115295>
- Muratori, M., Kheshgi, H., Mignone, B., Clarke, L., McJeon, H., & Edmonds, J. (2017). Carbon capture and storage across fuels and sectors in energy system transformation pathways. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 57, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.026>

- Mutani, G., & Todeschi, V. (2019). An urban energy atlas and engineering model for resilient cities. *International Journal of Heat and Technology*, 37(4), 936–947. <https://doi.org/10.18280/ijht.370402>
- Obama, B. (2017). The irreversible momentum of clean energy. *Science*, 355(6321), 126–129. <https://doi.org/10.1126/science.aam6284>
- Pereda, M., & Zamarreño, J. M. (2015). Modelado basado en agentes: Un enfoque desde la ingeniería de sistemas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12(3), 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.02.007>
- Pfenninger, S., Hawkes, A., & Keirstead, J. (2014). Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>
- Rai, V., & Henry, A. D. (2016). Agent-based modelling of consumer energy choices. *Nature Climate Change*, 6, 556–562. <https://doi.org/10.1038/nclimate2967>
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014). Cities and energy: Urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138–162. <https://doi.org/10.1068/b39065>
- Rosas-Flores, J. A., Zenón-Olvera, E., & Gálvez, D. M. (2019). Potential energy saving in urban and rural households of Mexico with solar photovoltaic systems using geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109412>
- Sachs, J., Meng, Y., Giarola, S., & Hawkes, A. (2019). An agent-based model for energy investment decisions in the residential sector. *Energy*, 172, 752–768. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.161>
- Salim, M. G. (2012). Selection of groundwater sites in Egypt, using geographic information systems, for desalination by solar energy in order to reduce greenhouse gases. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.02.008>
- Smajgl, A., Brown, D. G., Valbuena, D., & Huigen, M. G. A. (2011). Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(7), 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.011>
- Sousa, G., Jones, B. M., Mirzaei, P. A., & Robinson, D. (2017). A review and critique of UK housing stock energy models, modelling approaches and data sources. *Energy and Buildings*, 151, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.043>
- Stevens, F. R., Gaughan, A. E., Linard, C., & Tatem, A. J. (2015). Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data. *PLOS ONE*, 10(2), e0107042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107042>
- Sztubecka, M., Skiba, M., Mrówczyńska, M., & Bazan-Krzywoszańska, A. (2020). An innovative decision support system to improve the energy efficiency of buildings in urban areas. *Remote Sensing*, 12(2), 259. <https://doi.org/10.3390/rs12020259>
- Tian, S., & Chang, S. (2020). An agent-based model of household energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118378>
- Trotta, G. (2018). Factors affecting energy-saving behaviours and energy efficiency investments in British households. *Energy Policy*, 114, 529–539. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.042>
- Uva, M. A., & Campanella, O. (n.d.). *AP-SIG: Un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión*. Recuperado en octubre 18, 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/301040323.pdf>
- Vázquez, R. (2017). Uso de sistemas de información geográfica libres para la protección del medio ambiente. Caso de estudio: Manipulación de mapas ráster con datos climáticos [Use of free geographical information systems for the protection of the environment. Case study: Raster map management with climate data]. *Universidad y Sociedad*, 10(2), 158–164. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v10n2/2218-3620-rus-10-02-158.pdf>
- Wei, J., Huang, K., Yang, S., Li, Y., Hu, T., & Zhang, Y. (2017). Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions in Beijing: An input-output structural decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 163, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.086>

Anexos

Resultados de la encuesta

Figura 7. Demanda de energía per cápita en función de ingreso per cápita, caracterizado por las clases de ingresos en las zonas de vivienda

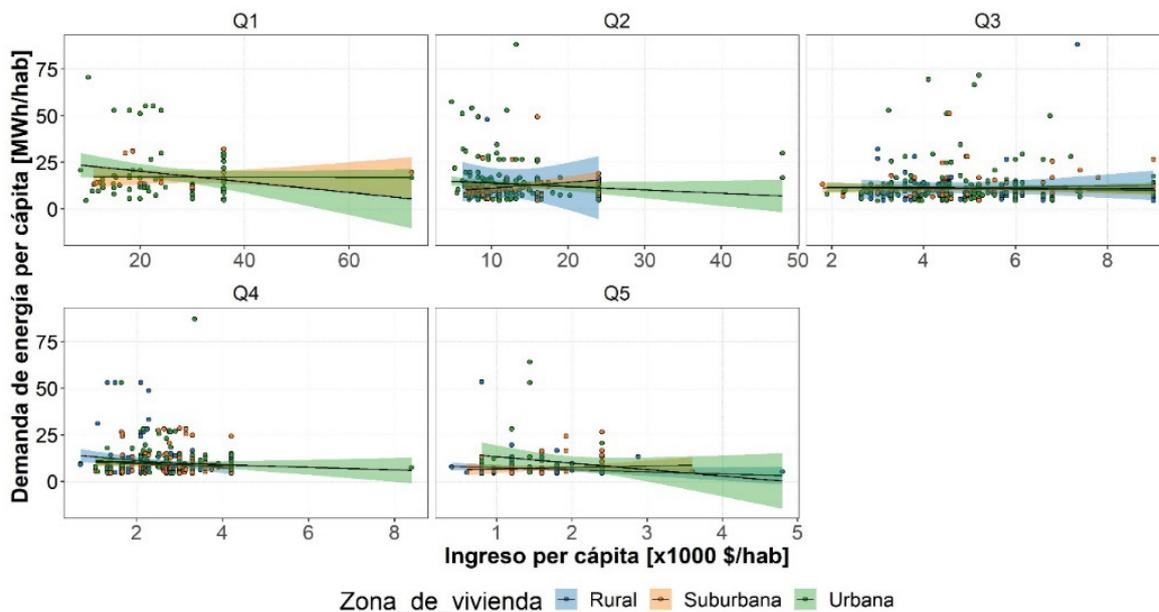


Figura 8. Tipos de vivienda en función de las ocupaciones de ingresos más altos, clasificadas por clases de ingresos

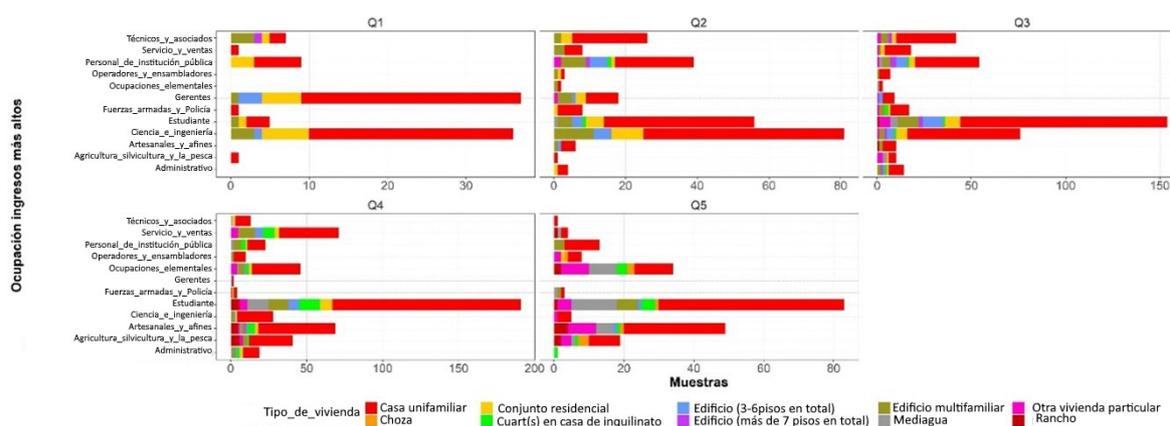


Figura 9. Tipo de vivienda en función del tipo de propiedad, clasificadas por las clases de ingresos

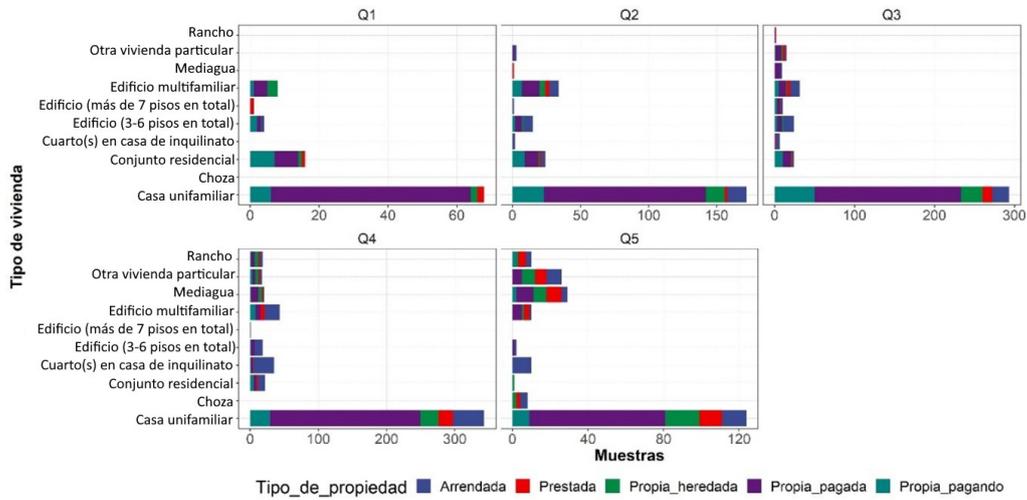


Figura 10. Ingreso familiar per cápita en función de clases de ingresos, caracterizados por el nivel de educación de los integrantes del hogar

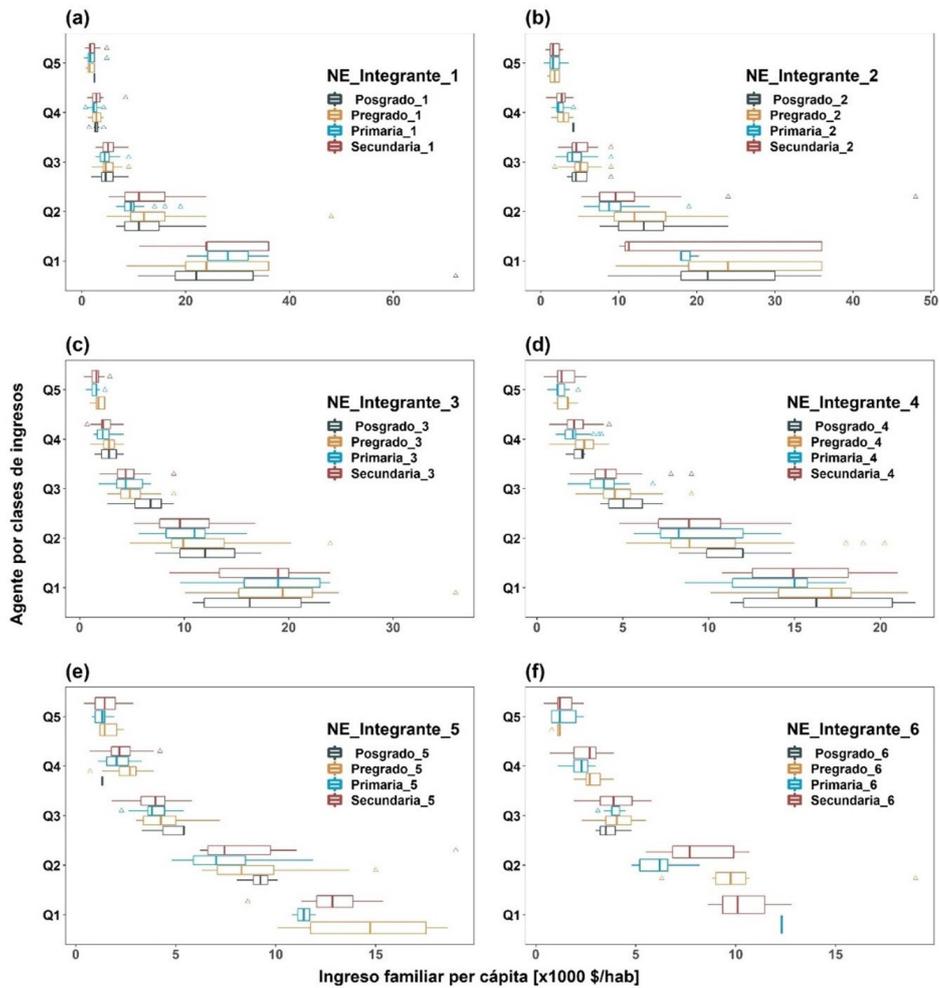


Figura 11. Tecnologías para calefacción de espacios en los hogares en función del ingreso familiar total, clasificadas por las clases de ingresos

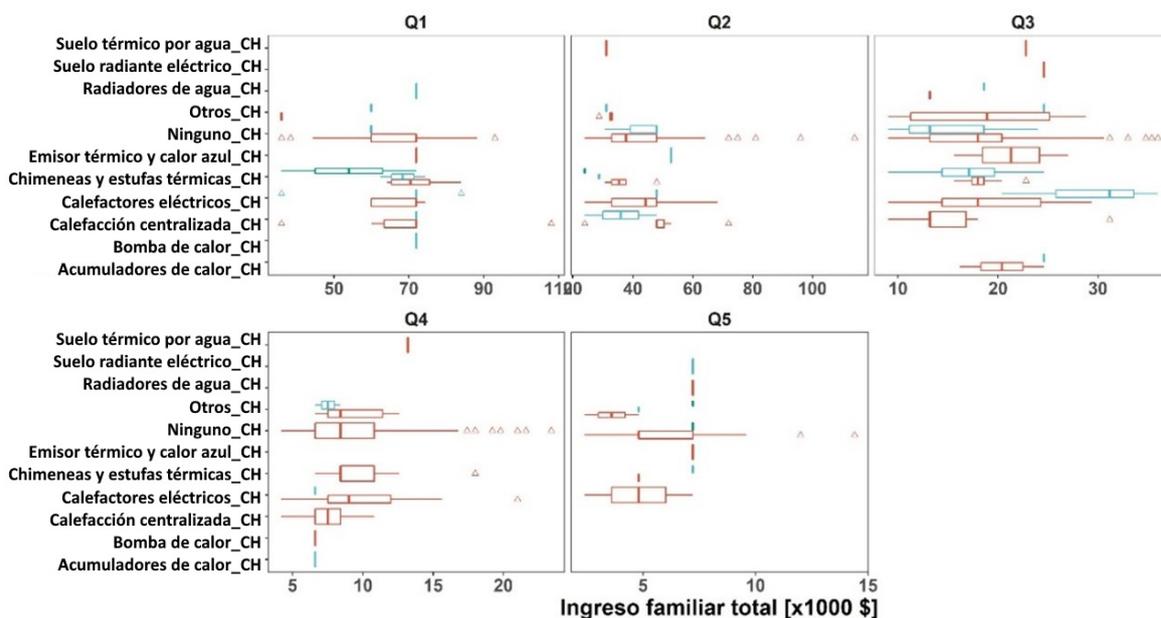


Figura 12. Tecnologías para el calentamiento de agua en los hogares en función del ingreso familiar total, clasificadas por las clases de ingresos

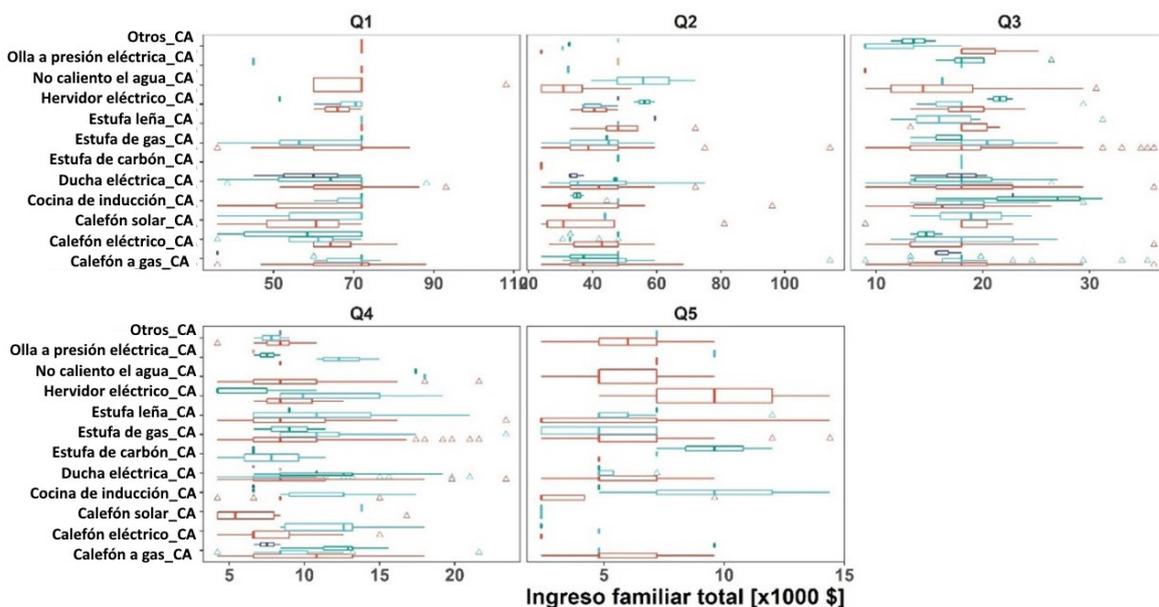


Figura 13. Tecnologías utilizadas para la cocción de alimentos en los hogares en función del ingreso familiar total, clasificadas por las clases de ingresos

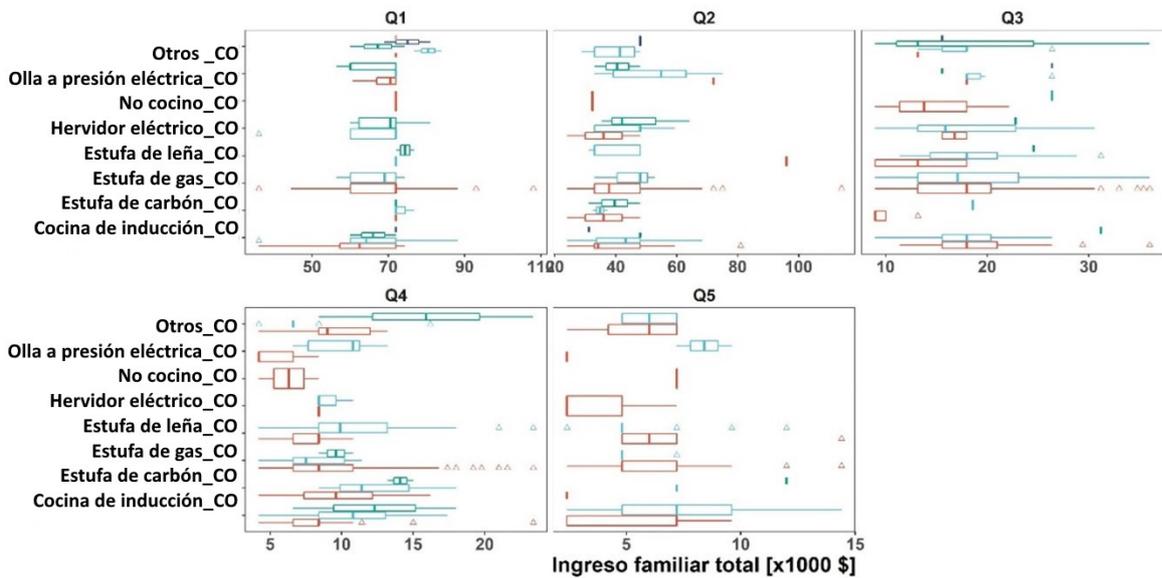
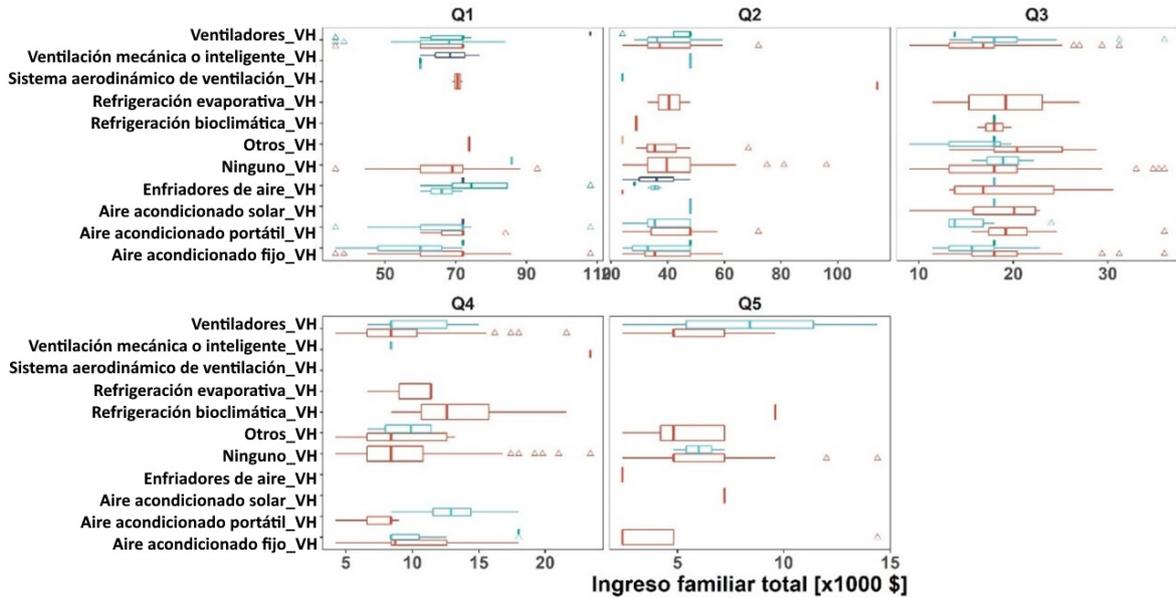
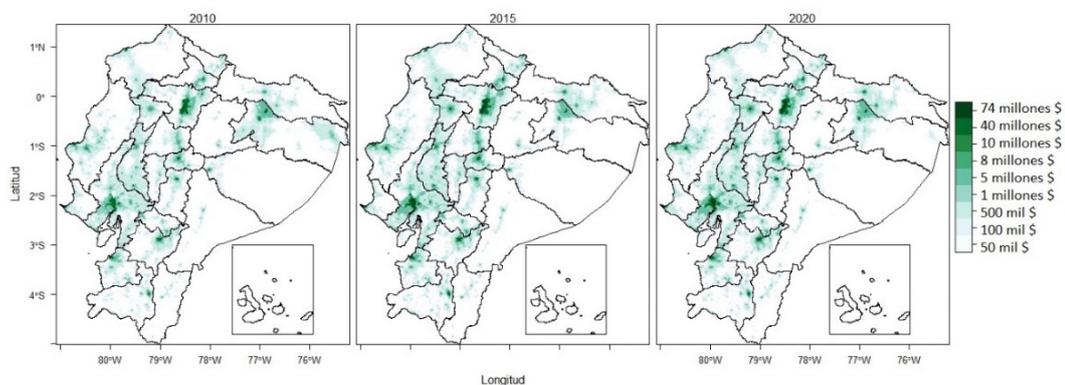


Figura 14. Tecnologías utilizadas para la ventilación de espacios en los hogares en función del ingreso familiar total, clasificadas por las clases de ingresos



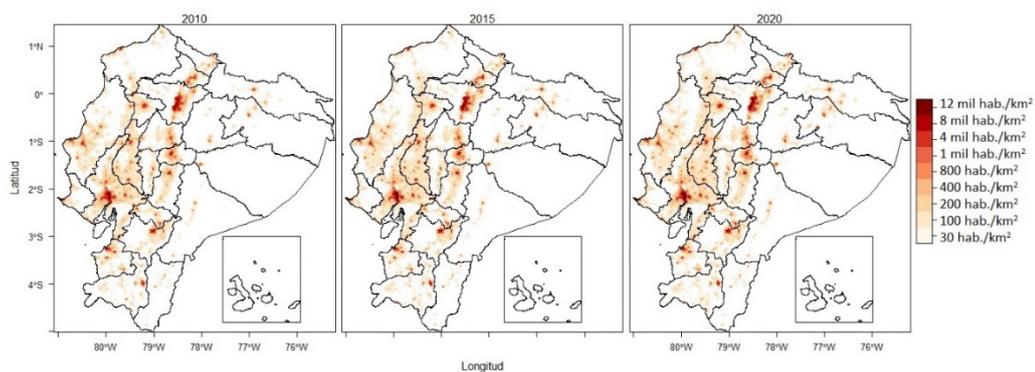
Mapa del PIB

Figura 15. Producto interno bruto por lustro



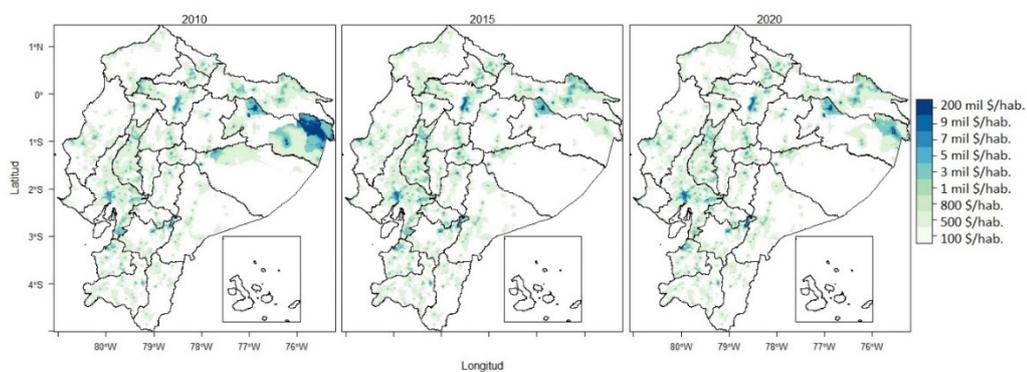
Mapa de la población

Figura 16. Densidad poblacional por lustro



Mapa del PIB per cápita

Figura 17. Producto interno bruto per cápita



Insecticidal potential of some indigenous weeds extracts of Bahawalpur Pakistan against dusky cotton bug (*Oxycarenus hyalinipennis*) (Costa) (Hemiptera: Lygaeidae) under laboratory conditions

(Potencial insecticida de algunos extractos de malas hierbas autóctonas de Bahawalpur Pakistán contra el chinche del algodón [*Oxycarenus hyalinipennis*] [Costa] [Hemiptera: Lygaeidae] en condiciones de laboratorio)

Noor ul Huda Fatima¹, Muhammad Waqar Hassan², Muhammad Iqbal³, Moazzam Jamil⁴, Javaid Iqbal⁵

Abstract

Owing to large scale use of chemical insecticides there is always need to find new alternatives to chemical insecticides. This study evaluated the aqueous extracts of three weeds namely *Datura alba* (Nees), *Withania somnifera* (Linnaeus) and *Chenopodium album* (Linnaeus) for insecticidal potential against *Oxycarenus hyalinipennis* (Costa) (Hemiptera: Lygaeidae) under laboratory conditions. Extracts were prepared from three plant parts e.g., leaves, stems and roots and applied at five concentrations ranging from 1 to 20 %. To check the mortality not because of weed extracts control treatment (water only) was also included as sixth treatment. Mortality of pest insects was assessed after three exposure periods e.g., 24h, 48h and 72 h. Among the three weeds tested, mortality was more due to extract of *D. alba* weed which thus proved more toxic compared to other two weeds. Among plant parts, root extracts were more potent than leaves and stem extracts and the more concentration of 20 per cent usually resulted in maximum mortality. Maximum mortality of insects was after 72 h period followed by 48 h and minimum was after 24 h period. However maximum mortality of 60 % in case of *D. alba* warrants attention towards the options of either increasing concentration (> 20 %) of this extract or to evaluate other extraction type e.g., ethanolic extract to gain maximum mortality against this notorious pest.

Keywords

Botanical insecticides, weeds, extract, insect control, dusky cotton bug

Resumen

El uso a gran escala de insecticidas químicos obliga a encontrar constantemente nuevas alternativas para los mismos. En este estudio se evaluaron los extractos acuosos de tres malas hierbas, a saber: *Datura alba* (Nees), *Withania somnifera* (Linnaeus) y *Chenopodium album* (Linnaeus) para determinar su potencial insecticida contra *Oxycarenus hyalinipennis* (Costa) (Hemiptera: Lygaeidae) en condiciones de laboratorio. Los extractos se prepararon a partir de tres partes de cada planta, por ejemplo, hojas, tallos y raíces, y se aplicaron en cinco concentraciones que oscilaron entre 1 y 20 %. Para comprobar la mortalidad no relacionada con los extractos de malas hierbas, también se incluyó un tratamiento de control (solo agua) como sexto tratamiento. La mortalidad de los insectos plaga se evaluó después de tres periodos de exposición, por ejemplo, 24 h, 48 h y 72 h. Entre las tres malas hierbas probadas, el extracto de *D. alba* resultó ser el más tóxico en comparación con las otras dos. En cuanto a las partes de cada planta, los extractos de las raíces fueron más potentes que los de las hojas y los tallos, y la concentración mayor del 20 % generalmente ocasionó la máxima mortalidad. La máxima mortalidad de insectos fue después de un periodo de 72 h, seguido de uno de 48 h, y la mínima fue después de un periodo de 24 h. Sin embargo, la mortalidad máxima del 60 % en el caso de *D. alba* justifica la atención hacia las opciones de aumentar la concentración (> 20 %) de este extracto o evaluar otro tipo de extracción, por ejemplo, el extracto etanólico para obtener la máxima mortalidad contra esta plaga.

Palabras clave

Insecticidas botánicos, malas hierbas, extracto, control de insectos, chinche de algodón oscuro

- 1 Department of Entomology, Faculty of Agriculture and Environment, Islamia University of Bahawalpur, Pakistan.
- 2 Department of Entomology, Faculty of Agriculture and Environment, Islamia University of Bahawalpur, Pakistan. [waqar.hassan@iub.edu.pk]
- 3 Department of Plant Breeding and Genetics, Faculty of Agriculture and Environment, Islamia University of Bahawalpur, Pakistan.
- 4 Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Environment, Islamia University of Bahawalpur, Pakistan
- 5 Department of Entomology, King Saud University, Kingdom of Saudi Arabia

1. Introduction

Dusky cotton bug *Oxycarenus hyalinipennis* (Costa) (Hemiptera: Lygaeidae) causing both qualitative and quantitative damages to cotton crop from many years (USDA, 2009-2010) is major pest of cotton with many alternate host plants such as citrus, mango, avocado, dates, apple, fig, pomegranate, corn, peach, grapes, okra and pineapple. Cotton is the main cash crop of Pakistan and is major source of foreign exchange earnings. The cotton contribution in economy of the country is 1.6 per cent while its contribution in agriculture is 7.8 per cent in terms of GDP (Farooq, 2012). It feeds generally on cotton seeds and reduces the viability by initiating damage to tissues causing 29.3 and 40.7 per cent damage to seed germination and cotton weight respectively when the population was 50 pairs per boll reducing the seed and oil contents to the tune of 42.9 and 36.1 per cent respectively (Srinivas and Patil, 2004).

Insecticides are most commonly being used for management of many insect pests. However these cause many problems such as environmental pollution which is a threat for the human health. Presently there is an increasing interest to evaluate the extracts of different plant species as an alternative source that might have insecticidal properties. These plants extracts may act like natural pesticides, fungicides, anti-feedants and repellent against different insect pests and are greatly safe for human beings and environment. Such plant species are recognized to have numerous bioactive compounds including alkaloids, steroids and flavonoids (Silva et al. 2005).

Several botanicals such as neem, rotenone, pyrethrum, essential oils, garlic, nicotine, ryania and sabadilla (Isman, 2005) are used as insecticides. There are various commercialization problems for these botanicals like shortage of natural sources, registration and their standardization (Isman, 1997). A number of plant species having insecticidal properties are at evaluation stages and will take some time to reach to the farmer. Many farmers in developing countries are applying them in crude form (Cloyd et al. 2009). The main advantages of botanicals is having low half-life, low human toxicity and can vanish from the environment in very short time (Shalan et al., 2005). Further these can be applied at any stage of crop plants even just before harvesting or at harvesting stage without any risk of exposure to toxic chemicals by humans, insecticide residues in the harvest produce or human health effects during botanical use or preparation.

In the previous few years, weeds are being more and more explored for their phytochemical, pharmacological and natural properties (Naqvi and Parveen, 1991; Ahmad et al., 2003a, b). Weeds are commonly classified as unwanted plants in the main crop and are regarded as crop pests; however, they have given away insecticidal properties as well against a lot of insects (Sagheer et al., 2013; Alkan et al., 2015; Vázquez-Covarrubias et al., 2015).

In Pakistan Bahawalpur region encompasses important flora and weeds for which insecticidal potential needs to be evaluated. Therefore in the current study, keeping in view the importance of this subject regarding insect pest management particularly for *O. hyalinipennis*, three weed plants namely *D. alba*, *C. album* and *W. somnifera* were targeted for the evaluation of their insecticidal efficacy against *Oxycarenus* under laboratory conditions.

2. Materials and Methods

The experiment was conducted during 2017 in completely randomized design (CRD) with five replications of each insecticide and a control treatment. Three weeds species were collected

from the cholistan area of Bahawalpur, Punjab Pakistan. These were identified as *Datura alba*, *Withania somnifera* and *Chenopodium album* (Table 1) with their local names. Three different parts of weeds namely leaves, stems and roots were separated and washed for the preparation of extracts.

Table 1. Selected indigenous weeds for extract preparation against *O. hyalinipennis* under laboratory conditions

Sr. No.	Local Name of Weed	Technical Name	Family	Plant parts used for extract preparation
1	Dhatura	<i>Datura alba</i> Nees	Solanaceae	Leaves, Stems, Roots
2	Aksin	<i>Withania Somnifera</i> Linnaeus	Solanaceae	Leaves, Stems, Roots
3	Bathu	<i>Chenopodium album</i> Linnaeus	Chenopodiaceae	Leaves, Stems, Roots

Hot water extraction method was used for each part of plant (leaves, stems and roots). Fresh weight (25 %) of the separately picked leaves, stems and roots (25gram) was mixed in 100 % distilled water (100 ml). The mixture was boiled at 100 °C then conditioned until it was cool (Barbosa et al., 2011). Afterwards five concentrations (1%, 5%, 10%, 15% and 20%) of each plant were prepared by dilution with distilled water and these were tested against *O. hyalinipennis*.

Dusky cotton bugs was collected from the field of cotton crop (*Gossypium hirsutum*) of the Islmia University of Bahawalpur. For insect bioassay adults and nymphs of collected insects were reared in transparent plastic cages under the conditions of 28 ± 2 °C, 65± 5% (R.H.) and a photoperiod of 14:8 h in laboratory (Khan et al., 2013). The mouth of plastic container was covered with muslin cloth. Fresh cotton bolls were provided on daily basis by replacing dried bolls (Srinivas and Patil, 2004). Cotton wicks were soaked in water and were provided to meet the moisture requirement (Ananthakrishnan et al., 1982). Egg laying was observed on lint and seeds. Freshly laid eggs are transparent light yellow in color oval and cigar shaped (Nayar et al., 1985). Eggs were collected and transferred to Petri dishes for hatching. To avoid the eggs desiccation, moistened blotting paper was provided in Petri dishes (Srinivas and Patil, 2004). Newly emerged nymphs were transferred to rearing medium to get the F1 generation. Cotton seeds soaked in water (Khan et al., 2013) and fresh cotton bolls with 10 % honey were provided as food (Srinivas and Patil, 2004).

Bioassay and Data Collection

Leaves of cotton (*Gossypium hirsutum*) were immersed for 1 minute in each concentration [1%, 5%, 10%, 15% and 20% and control (water only)] of each extract. These leaves were maintained in the shade and under free air for two h until excess water evaporated (Barbosa et al., 2011). After this, 20 *O. hyalinipennis* freshly emerged adults were released in Petri dishes to check mortality. The control treatment was treated with distilled water used in extraction process and dried similarly to the sample.

Data were recorded after 24, 48 and 72 h by visual inspection and per cent mortality was calculated by using formula

$$\text{Percent mortality} = x = \frac{\text{Insects dead}}{\text{Total Insects}} \times 100$$

If mortality in treatments exceeded 5 %, it was corrected by using abbot's formula (Abbot 1925) as under

$$\text{Abbott formula} = x = \frac{X - Y}{100 - Y} \times 100$$

Where,

x = Corrected mortality (%)

X = Actual mortality (%)

Y = Control mortality (%)

Statistical analysis

Data were analyzed statistically by using Statistix software (Analytical software version 8.1). Analysis was done by factorial ANOVA separately for each weed for each time interval (24 h, 48 h and 72 h data) taking mortality data as dependent variable and independent variables were plant parts (leaves, stems and roots) and five concentrations. Interaction results of plant parts and concentration for each weed against each time period are reported as these summed up all important results. Mean were separated post hoc by Tukey HSD test at 5 % level of probability. A scatter plot diagram was obtained by putting together all mortality data from three weeds together to see the effect of weeds, concentrations, plant parts and time period on mortality of this pest.

3. Results and Discussion

After 24 h period, maximum mortality of *O. hyalinipennis* due to *D. alba* was (47.000 ± 5.700) due to interaction between root extract along with 20 % concentration while minimum mortality was recorded (4.000 ± 4.183) due to interaction between stem extract along with 1 % concentration ($P < 0.05$). For *W. somnifera* weed extracts, maximum mortality during 24 hours period was (4.000 ± 4.183) due to interaction between root extract along with 20 % concentration while minimum mortality was (0.000 ± 0.000) due to interaction between root extract along with 10 % concentration ($P < 0.05$). For *C. album* maximum mortality was (2.000 ± 4.4721) due to interaction between stem extract and 15% concentration while minimum mortality recorded was (0.000 ± 0.000) due to interaction between root extract along with 20 % concentration ($P > 0.05$) (Table 2).

Table 2. Mortality (means ± Sd) of *O. hyalinipennis* due to three weeds extracts by the interaction between plant parts and concentrations after 24 hours

Mortality due to <i>D. alba</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>W. somnifera</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>C. album</i> (Plant part × Concentration)
47.000 ± 5.700 _(Root × 20) a	4.000 ± 4.183 _(Root × 20) a	2.000 ± 4.4721 _(Stem × 15) a
37.368 ± 4.340 _(Leaves × 20) ab	2.000 ± 2.738 _(Root × 15) ab	2.000 ± 2.738 _(Root × 15) a
35.000 ± 5.000 _(Root × 15) b	1.000 ± 2.236 _(Leaves × 1) ab	1.000 ± 2.236 _(Leaves × 10) a
32.316 ± 2.534 _(Leaves × 15) b	1.000 ± 2.236 _(Leaves × 10) ab	1.000 ± 2.236 _(Stem × 5) a
29.000 ± 2.236 _(Root × 10) bc	1.000 ± 2.236 _(Stem × 1) ab	1.000 ± 2.236 _(Root × 10) a

27.211 ± 6.445 _(Leaves × 10) bc	1.000 ± 2.236 _(Stem × 10) ab	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 1) a
21.000 ± 2.167 _(Leaves × 5) cd	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 5) b	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 5) a
21.000 ± 4.183 _(Root × 5) cd	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 15) b	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 15) a
19.158 ± 4.005 _(Leaves × 1) cd	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 20) b	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 20) a
18.544 ± 2.580 _(Stem × 20) cde	0.000 ± 0.000 _(Stem × 5) b	0.000 ± 0.000 _(Stem × 1) a
15.216 ± 6.782 _(Stem × 15) de	0.000 ± 0.000 _(Stem × 15) b	0.000 ± 0.000 _(Stem × 10) a
11.000 ± 5.477 _(Root × 1) def	0.000 ± 0.000 _(Stem × 20) b	0.000 ± 0.000 _(Stem × 20) a
8.164 ± 6.621 _(Stem × 10) ef	0.000 ± 0.000 _(Root × 1) b	0.000 ± 0.000 _(Root × 1) a
8.053 ± 5.667 _(Stem × 5) ef	0.000 ± 0.000 _(Root × 5) b	0.000 ± 0.000 _(Root × 5) a
4.000 ± 4.183 _(Stem × 1) f	0.000 ± 0.000 _(Root × 10) b	0.000 ± 0.000 _(Root × 20) a

Means in a column with different alphabets are significantly different $P < 0.05$.

After 48 h, maximum mortality due to *D. alba* extract was (52.421 ± 6.764) due to interaction between root extract and 20 % concentration while minimum mortality was (7.216 ± 4.507) due to interaction between stem extract and 1 % concentration ($P < 0.05$). Maximum mortality due to *W. somnifera* extract was (9.000 ± 4.183) due to interaction between root extract and 20 % concentration while minimum mortality was (0.000 ± 0.000) due to interaction between stem extract and 1 % concentration ($P > 0.05$). Maximum mortality due to *C. album* was (4.000 ± 4.183) due to interaction between root extract and 15 % concentration while minimum mortality was (0.000 ± 0.000) due to interaction between root extract and 1 % concentration ($P > 0.05$) (Table 3).

Table 3. Mortality (means ± Sd) of *O. hyalinipennis* due to three different weeds extracts due to interaction between plant parts and concentrations after 48 hours

Mortality due to <i>D. alba</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>W. somnifera</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>C. album</i> (Plant part × Concentration)
52.421 ± 6.764 _(Root × 20) a	9.000 ± 4.183 a _(Root × 20) a	4.000 ± 4.183 _(Root × 15) a
44.895 ± 5.584 _(Leaves × 20) ab	8.000 ± 2.738 a _(Leaves × 20) a	3.000 ± 4.472 _(Stem × 20) a
44.368 ± 8.508 _(Root × 15) abc	7.000 ± 2.236 a _(Root × 15) a	3.000 ± 4.472 _(Root × 20) a
36.684 ± 5.022 _(Leaves × 15) bcd	5.000 ± 2.236 a _(Stem × 20) a	2.000 ± 2.738 _(Leaves × 10) a
35.316 ± 6.822 _(Root × 10) bcd	5.000 ± 2.236 a _(Leaves × 5) a	2.000 ± 2.738 _(Root × 10) a
31.579 ± 8.130 _(Leaves × 10) cde	5.000 ± 2.236 a _(Leaves × 15) a	1.000 ± 2.236 _(Leaves × 20) a
29.316 ± 5.593 _(Root × 5) def	5.000 ± 0.000 a _(Root × 10) a	1.000 ± 2.236 _(Stem × 5) a
26.474 ± 5.158 _(Leaves × 5) def	4.000 ± 0.000 a _(Root × 5) a	1.000 ± 2.236 _(Stem × 10) a
24.918 ± 3.535 _(Stem × 20) def	3.000 ± 0.000 a _(Stem × 15) a	1.000 ± 2.236 _(Stem × 15) a
21.421 ± 2.068 _(Leaves × 1) efg	3.000 ± 0.000 a _(Leaves × 1) a	1.000 ± 2.236 _(Root × 1) a

19.696 ± 5.466 _(Stem × 15) efg	2.000 ± 0.000 a _(Leaves × 10) a	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 1) a
19.105 ± 7.258 _(Root × 1) efgh	2.000 ± 0.000 a _(Stem × 10) a	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 5) a
13.544 ± 4.533 _(Stem × 10) fgh	1.000 ± 0.000 a _(Stem × 5) a	0.000 ± 0.000 _(Leaves × 15) a
11.322 ± 5.407 _(Stem × 5) gg	1.000 ± 0.000 a _(Root × 1) a	0.000 ± 0.000 _(Stem × 1) a
7.216 ± 4.507 _(Stem × 1) h	0.000 ± 0.000 a _(Stem × 1) a	0.000 ± 0.000 _(Root × 5) a

Means in a column followed by different alphabets are statistically different at P: 0.05.

After 72 h, maximum mortality due to *D. alba* extract was (60.269 ± 6.764) due to interaction between root extract and 20 % concentration while minimum mortality was (14.643 ± 4.507) due to interaction between stem extract and 1 % concentration ($P < 0.05$). Maximum mortality due to *W. Somnifera* was (16.158 ± 4.183) due to interaction between root extract and 20 % concentration while minimum mortality was (1.778 ± 0.000) due to interaction between stem extract and 1 % concentration ($P < 0.05$). Maximum mortality due to *C. album* was recorded (5.000 ± 5.000) due to interaction between root extract and 15 % concentration while minimum mortality was recorded (1.000 ± 2.236) due to interaction between root extract and 5 % concentration ($P > 0.05$) (Table 4).

Table 4. Mortality (means ± Sd) of *O. hyalinipennis* after 72 hours due to three different weeds species caused by interaction between plant parts and concentrations

Mortality due to <i>D. alba</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>W. somnifera</i> (Plant part × Concentration)	Mortality due to <i>C. album</i> (Plant part × Concentration)
60.269 ± 6.764 _(Root × 20) a	16.158 ± 4.183 _(Root × 20) a	5.000 ± 5.000 _(Root × 15) a
53.579 ± 5.584 _(Leaves × 20) ab	14.053 ± 2.738 _(Root × 15) ab	4.053 ± 4.200 _(Stem × 20) a
49.731 ± 8.508 _(Root × 15) ab	12.105 ± 2.236 _(Leaves × 20) ab	4.000 ± 5.477 _(Leaves × 20) a
46.316 ± 5.022 _(Leaves × 15) bc	11.158 ± 2.236 _(Root × 10) ab	4.000 ± 4.183 _(Root × 10) a
42.620 ± 6.822 _(Root × 10) bcd	11.105 ± 2.236 _(Stem × 20) ab	4.000 ± 4.183 _(Root × 20) a
33.947 ± 8.130 _(Leaves × 10) cde	9.053 ± 2.236 _(Stem × 15) ab	3.053 ± 4.503 _(Stem × 15) a
33.556 ± 5.593 _(Stem × 20) cde	7.053 ± 0.000 _(Root × 5) ab	3.053 ± 4.503 _(Stem × 10) a
31.947 ± 5.158 _(Leaves × 5) de	6.105 ± 0.000 _(Leaves × 10) ab	3.000 ± 4.472 _(Leaves × 5) a
29.965 ± 3.535 _(Root × 5) def	6.053 ± 0.000 _(Leaves × 5) ab	3.000 ± 2.738 _(Leaves × 10) a
26.789 ± 2.068 _(Leaves × 1) efg	6.053 ± 0.000 _(Root × 1) ab	3.000 ± 4.472 _(Leaves × 15) a
24.129 ± 5.466 _(Stem × 15) efg	5.053 ± 0.000 _(Stem × 10) ab	3.000 ± 4.472 _(Root × 1) a
22.754 ± 7.258 _(Root × 1) efg	5.000 ± 0.000 _(Leaves × 15) ab	1.947 ± 5.782 _(Stem × 5) a
17.860 ± 4.533 _(Stem × 10) fg	5.000 ± 0.000 _(Stem × 5) ab	1.000 ± 2.236 _(Leaves × 1) a
17.807 ± 5.407 _(Stem × 5) fg	3.000 ± 0.000 _(Leaves × 1) b	1.000 ± 2.236 _(Stem × 1) a
14.643 ± 4.507 _(Stem × 1) g	1.778 ± 0.000 _(Stem × 1) b	1.000 ± 2.236 _(Root × 5) a

Means in a column followed by different alphabets are statistically different at P: 0.05.

Botanicals like neem extracts have been recommended against *O. hyalinipennis* along with chemical insecticides (USDA 2021). Current study results can be compared with Abbas et al. (2015) which stated that greater concentrations of 2.5 and 5 % of some plant extracts led to more mortality of *O. hyalinipennis* compared with their less concentrations however they used different set of plants eg. Milkweed, tobacco, neem, citrus, castor and moringa.

A study (Sultana et al., 2016) conducted on efficacy of extracts of some medicinal plants against a stored grain pest *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Cucujidae) indicated that mortality of pest insect increased with increasing oil extract concentration. These results suggest that weeds extracts can give increased mortality of *Oxycarenus* Spp. if the concentration of plant extracts is increased.

Comparison of results along three time periods shows that maximum mortality of *O. hyalinipennis* was generated after 72 h' time periods and minimum and least mortality was after 24 h' time periods. These results are in agreement with those of Sultana et al. (2016) that showed mortality of *Trogoderma granarium* (Everts) (Coleoptera: Dermestidae) treated with weed extract was significantly more after six days than after four or two days treatment time. However repellency of insects decreased as treatment period increased in their experiments. These results can also be compared with those of Saleem et al. (2014). Their results showed mortality of different storage pests insects increased by increasing extract concentrations and exposure time for different medicinal plant extracts including *Datura* extract.

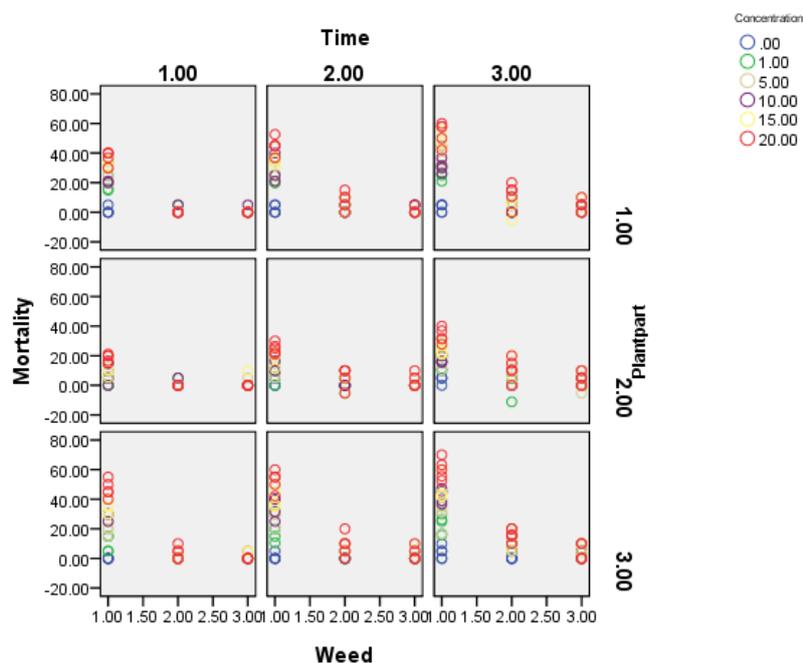
Our results can be compared with other studies that showed the relative importance of different plant parts for difference in their toxicological effects. A study (Asiry, 2015) showed that stem aqueous extracts of bitter apple was revealed to be more effective than its root by 0.83 per cent, its leaf by 0.47 per cent and its fruit by 0.36% for managing *Rhopalosiphum padi* (L.) (Homoptera: Aphididae). Thus it becomes imperative to evaluate insecticidal potential of whole plant and all of its parts separately as well.

It has been stated that in a comparative studies of plant oils against pulse beetles, although other botanicals compared with neem resulted in significantly less mortality of pest species yet those had negative effect on other life history parameters for this pest species for example prevention of egg laying and reduced population buildup (Sharma et al. 2016).

Overall efficacy of weeds' hot water extracts in terms of mortality of *O. hyalinipennis*

Overall efficacy is shown by scatter plot diagram (Fig 1). The diagram shows mortality is more in case of *D. alba* followed by *W. somnifera* and least due to *C. album*. Effect of concentrations shows minimum mortality due to 1 % extract and maximum is often due to highest concentration of 20%. Plant parts effect shows root extracts usually yielded the highest mortality followed by leaf extracts and minimum due to stem extracts. Effect of time period shows maximum mortality after 72 h and minimum after 24 h.

Figura 1. Overall efficacy of three weeds' hot water extracts in terms of mortality of *O. hyalinipennis* by scatter plot diagram



Time: 1: 24 h, 2: 48 h, 3: 72 h; Plantpart: 1: Leaves, 2: Stems, 3: Roots; Weed: 1: *Datura alba*, 2: *Withania somnifera*, 3: *Chenopodium album*

4. Conclusion

This study revealed that the weed species *D. alba* proved potent among the tested weeds against *O. hyalinipennis* resulting in maximum mortality. On the other hand, maximum mortality of 60 % limit under current conditions suggest to either increase the concentration of this weed e.g., *D. alba* against this pest to gain maximum mortality following this method or some other extraction method e.g. ethanolic extracts should be evaluated to gain greater mortality of this species.

References

- Abbas, M., Hafeez, F., Farooq, M., & Ali, A. (2015). Dusky cotton bug *Oxycarenus* spp. (Hemiptera: Lygaeidae): Hibernating sites and management by using plant extracts under laboratory conditions. *Polskie Pismo Entomologiczne*, 84(3), 127–136. <https://doi.10.1515/pjen-2015-0010>
- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265–267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Ahmad, B., Jan, Q., Bashir, S., Choudhary, M. I. & Nisar, M. (2003b). Phytochemical evaluation of *Chenopodium murale* Linn. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2(15-16), 1072–1078. <https://doi.org/10.3923/ajps.2003.1072.1078>
- Ahmad, B., Jan, Q., Bashir, S., Nisar, M., Shaheen, F., & Ahmad, M. (2003a). Pharmacological and biological investigations of *Chenopodium murale* Linn. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2(15), 1107–1111. <https://doi.org/10.3923/ajps.2003.1107.1111>
- Alkan, M., Gökçe, A., & Kara, K. (2015). Antifeedant activity and growth inhibition effects of some plant extracts against larvae of Colorado potato beetle [*Leptinotarsa decemlineata* Say (Col: Chyrso-

- melidae]] under laboratory conditions. *Turkish Journal of Entomology*, 39(4), 345–353. <https://doi.org/10.16970/ted.35600>
- Ananthakrishnan, T. N., Raman, K., & Sanjayon, K. (1982). Comparative growth rate, fecundity and behavioural diversity of the dusky cotton bug, *Oxycarenus hyalinipennis* Costa (Hemiptera: Lygaeidae) on certain malvaceous host plants. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 48(5B), 577–584. <https://bit.ly/3CdPI7l>
- Asiry, K. A. (2015). Aphidicidal activity of different aqueous extracts of bitter apple *Citrullus colocynthis* (L.) against the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.) (Homoptera: Aphididae) under laboratory conditions. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 25(2), 456–462. <http://www.thejaps.org.pk/docs/v-25-02/19.pdf>
- Barbosa, F. S., Leite, G. L. D., Paulino, M. A. O., Guilherme, D. O., Souza, J., & Farnandes, R. C. (2011). Toxicity of extracts of *Cyperus rotundus* on *Dibrotica speciose*. *Acta Scientiarum Agronomy*, 33(4), 607–611. <https://bit.ly/3pZ4wBV>
- Cloyd, R. A., Galle, C. L., Keith, S. R., Kalscheur, N. A., & Kemp, K. E. (2009). Effect of commercially available plant-derived essential oil products on arthropod pests. *Journal of Economic Entomology*, 102(4) 1567–1579. <https://bit.ly/3vDRXIJ>
- Farooq, O. (2012). Economic Survey of Pakistan, 2010-11. Islamabad, Govt. Pak. 17–35.
- Isman, M. (1997). Neem and other botanical insecticides: Barriers to commercialization. *Phytoparasitica*, 25(4), 339–344. <https://doi.org/10.1007/BF02981099>
- Isman, M. B. (2005). Botanical insecticides, deterrents and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 45–66. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146>
- Khan, M. A., Gogi, M. D., Bashir, M. H., Hussain M., Abidin, Z., & Rashid M. A. (2013). Assessment of density dependent feeding damage by cotton dusky bug, *Oxycarenus laetus* Kirby (Hemiptera: Lygaeidae), in cotton. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 198–206. <https://doi.org/10.3906/tar-1303-21>
- Naqvi, S. N. H., & Parveen, F. (1991). Toxicity and residual effect of *Nerium indicum* crude extract as compared with Coopex against adults of *Tribolium castaneum*. *Pakistan Journal of Entomology*, 6, 35–44.
- Nayar, N. K., Ananthakrishnan, T. N., & David, B. V. (1985). The study of dusky cotton bug, *Oxycarenus hyalinipennis*. En N. K. Nayar, T. N. Ananthakrishnan, & B. V. David, *General and Applied Entomology* (). P. 174. McGraw-Hill.
- Sagheer, M., Hasan, M., Majid, A., Ali, Q., Shahid, M. I., & Ali, K. (2013). Repellent potential of three medicinal plant extracts against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Punjab University Journal of Zoology*, 33(2), 121–126.
- Saleem, S., Hassan, M., Sagheer, M., & Sahi, S. T. (2014). Insecticidal activity of essential oils of four medicinal plants against different stored grain insect pests. *Pakistan Journal of Zoology*, 46(5), 1407–1414. <https://bit.ly/3IHZBMM>
- Shaalán, E., Canyon, D., Younes, M., Abdel-Wahab, H., & Mansour, A. (2005). A review of botanical phytochemicals with mosquitocidal potential. *Environment International*, 31(8), 1149–1166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.003>.
- Sharma, R., Devi, R., Yadav, S., Sharma, R., Sharma, U., Kumar, A., & Godara, P. (2016). Effect of some botanicals against pulse beetle, *Callosobruchus maculatus* (F.) infesting pigeonpea. *Legume Research*, 39(6), 1043–1047. <https://doi.org/10.18805/lr.v39i6.6647>
- Silva, T. M. S., Agra, M. F., & Bhattacharyya, J. (2005). Studies on the alkaloids of *Solanum* of northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 15(4), 292–293. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2005000400005>
- Srinivas, M., & Patil, V. B. (2004). Biology of dusky cotton bug, *Oxycarenus laetus* Kirby (Hemiptera: Lygaeidae) on cotton. *Karnataka Journal of Agriculture Sciences*, 17(2), 341–344. <https://bit.ly/3tt3I96>

- Statistix 8.1. (2003). User's Manual. Analytical Software, Tallahassee.
- Sultana, K., Zahoor, M. K., Sagheer, M., Nasir, S., Zahoor, M. A., Jabeen, F., & Riaz, B. (2016). Insecticidal activity of weed plants, *Euphorbia prostrata* and *Chenopodium murale* against stored grain insect pest *Trogoderma granarium* Everts, 1898 (Coleoptera: Dermestidae). *Turkish Journal of Entomology*, 40(3), 291–301. <https://doi.org/10.16970/ted.19938>
- Halbert, S., & Dobbs, Thomas. (2010, marzo 31). *Cotton seed bug, Oxycarenus hyalinipennis (Costa): A serious pest of cotton that has become established in the Caribbean Basin*. Pest Alert, FDACS-P01726. <https://bit.ly/3trY1rX>
- USDA. (2021, abril 23). *Technical Bulletin- Oxycarenus hyalinipennis (Costa) (Hemiptera: Oxycarenidae) Cotton seed bug*. Animal and Plant Health Inspection Service, Plant Protection and Quarantine. United States Department of Agriculture. <https://bit.ly/3IOheur>
- Vázquez-Covarrubias, D. A., Jiménez-Pérez A., Castrejón-Ayala F., Figueroa-Brito R., & Belmont R. M. (2015). Effects of five species of Chenopodiaceae on the development and reproductive potential of *Capitarsia decolora* (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomologist*, 98(1), 80–85. <https://journals.flvc.org/flaent/article/view/84344>

