

# ENFOQUE

UTE  
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias  
eISSN:13906542



Volumen 13 • N°1 • Enero 2022



## Sumario

---

DESALINIZADOR SOLAR DE MÚLTIPLES ETAPAS PARA SU APLICACIÓN EN ZONAS COSTERAS DEL ECUADOR (Multi-stage solar desalination system for water production in coastal areas of Ecuador) <i>Esteban Urresta, Marcelo Moya, Andrés Campana, Darío Rodríguez.....</i>	1
TELECOMMUTING AS A SUSTAINABLE TRANSPORTATION MEASURE IN ECUADOR (Teletrabajo como una medida de transporte sostenible en Ecuador) <i>Alvaro Corral Naveda .....</i>	23
INFLUENCIA DEL ESTADO DE CONDUCCIÓN, TIPO DE VEHÍCULO Y CONDICIONES DE VIAJE EN LAS VARIABLES CINEMÁTICAS DE LAS RUTAS EN AUTOBUSES URBANOS. CASO DE ESTUDIO IBARRA-ECUADOR (Influence of the Driving Cycle, Type of Vehicle and Travel Conditions in the Cinematic Variables of the Routes in Urban Buses. Case Study Ibarra-Ecuador) <i>Fredy Rosero, Zamir Mera, Ramiro Rosero, Fausto Tapia, Rommel Imbaquingo, Jordán Ramirez .....</i>	42
BARRAS ENERGÉTICAS DE SACHA INCHI: OPTIMIZACIÓN DE LA FORMULACIÓN MEDIANTE DISEÑO ESTADÍSTICO DE MEZCLAS (Sacha Inchi Energy Bars: Formulation optimization with Statistical Mix Design) <i>Katherine Verduga, Jorge Luis Santamaría, Gilda Gordillo, Carolina Montero.....</i>	58
GESTIÓN DEL GOBIERNO ABIERTO Y USO DEL PORTAL DE TRANSPARENCIA EN UNA UNIVERSIDAD PÚBLICA PERUANA (Management of Open Government and Use of the Transparency Portal in a Peruvian Public University) <i>John Ruiz-Cueva, Lloy Pinedo-Tuanama, Percy Barbarán-Mozo, Luis Pretell-Paredes .....</i>	73
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CON GEOMETRÍA ROCKER-BOGIE (Design of a Robot Prototype with Rocker Geometry-Bogie) <i>Christian Montaleza, Xavier Mayorga, Jimmy Gallegos y Rogelio León. ....</i>	82



# Desalinizador solar de múltiples etapas para su aplicación en zonas costeras del Ecuador

## *(Multi-stage solar desalination system for water production in coastal areas of Ecuador)*

Esteban Urresta<sup>1</sup>, Marcelo Moya<sup>2</sup>, Andrés Campana<sup>3</sup>, Darío Rodríguez<sup>4</sup>.

### Resumen

Se ha desarrollado un desalinizador solar con recuperación de calor para su aplicación en zonas costeras del Ecuador con escasez de agua dulce. El aparato consta de una torre de destilación de 3 etapas conectada a un colector solar plano. La energía solar absorbida por el colector es transferida mediante circulación natural a la torre de destilación, donde en cada etapa se recupera el calor de condensación del agua para incrementar el destilado producido. El diseño modular del equipo permite variar la producción de agua, desde unos pocos litros hasta más de un metro cúbico al día. El prototipo tiene pocas partes móviles y puede ser armado y desarmado rápidamente, lo que facilita su operación y mantenimiento. La producción mensual promedio del desalinizador varía entre 4.3 y 5.8 kg/día (2.44 y 3.29 kg/m<sup>2</sup>). El desempeño del desalinizador fue analizado con un modelo matemático, cuya exactitud fue mejorada al evaluar experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor por convección presentes en la torre de destilación. Se realizó una simulación en Matlab-Simulink que permite predecir las temperaturas, destilado generado y flujos de calor en la unidad. La simulación de un día completo de operación del destilador tuvo resultados muy satisfactorios, con una diferencia de únicamente el 7.7 % entre los datos teóricos y experimentales. La simulación también fue utilizada para analizar mejoras en el desempeño del equipo, determinándose que la producción del desalinizador podría incrementarse hasta en un 107 %.

### Palabras clave

Desalinización, destilador, múltiples etapas, colector solar, simulación.

### Abstract

*A solar desalination system with heat recovery has been developed for coastal areas of Ecuador with a shortage of freshwater. The prototype consists of a 3-stage distillation tower connected to a flat plate solar collector. The solar energy absorbed by the collector is transferred by natural circulation to the distillation tower, wherein the heat of condensation of water is recovered in each stage to increase distillate output. The modular design of the equipment allows water production to be varied, from a few liters to more than a cubic meter per day. The prototype has few moving parts and can be rapidly disassembled and assembled, greatly facilitating its operation and maintenance. The average monthly production of the desalination unit varies between 4.3 and 5.8 liters per day (2.44 and 3.29 kg/m<sup>2</sup>). A mathematical model was created to analyze system performance. The accuracy of this model was improved by experimentally evaluating the convection heat transfer coefficients in the distillation tower. A simulation program was developed in Matlab-Simulink to predict the temperature profiles, distillate output, and heat flows in the unit. The simulation results for one day of prototype operation were very satisfactory, with a difference of only 7.7 % between theoretical and experimental data. The simulation was also used to analyze improvements in equipment performance, which determined that freshwater yield could be increased by up to 107 %.*

### Keywords

Desalination, distillation, multi-stage, solar collector, simulation.

- 1 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Quito, Ecuador. [esteban.urresta@geoenergia.gob.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7202-7913>]
- 2 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Quito, Ecuador. [marcelo.moya@geoenergia.gob.ec, <https://orcid.org/0000-0002-6370-9637>]
- 3 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Quito, Ecuador. [andres.campana@geoenergia.gob.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3514-9660>]
- 4 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Quito, Ecuador. [dario.rodriguez@geoenergia.gob.ec, <https://orcid.org/0000-0002-5720-7358>]

## 1. Introducción

Un acceso adecuado al agua pura es un factor muy importante en el desarrollo social y económico de un país o región. No obstante, en muchas partes del mundo el agua es escasa o no cumple con los estándares mínimos de calidad que la hacen apta para su consumo. Al observar la situación del Ecuador es fácil advertir la existencia de grandes recursos hídricos en su territorio, pero también es evidente su distribución irregular en el tiempo y el espacio. Por ejemplo, la disponibilidad de agua dulce se reduce considerablemente en la provincia de Santa Elena, en el suroeste de la provincia de Manabí, en la isla Puna y en las islas Galápagos (Buckalew et al., 1998; SENAGUA, 2017).

En estos lugares el agua dulce podría obtenerse del mar a través de la desalinización, proceso que es aplicado en diversas partes del mundo, generalmente con plantas de gran escala. Sin embargo, los elevados costos de estas instalaciones reducirían significativamente su implementación en el Ecuador, donde sistemas más económicos y de menor escala son más convenientes. En este sentido, la destilación solar es una buena alternativa para brindar un servicio de desalinización, principalmente destinado a satisfacer las necesidades de agua potable de pequeñas comunidades costeras y grupos aislados.

La obtención de agua dulce por medio de la destilación solar se conoce desde hace miles de años, pero se puede afirmar que el periodo moderno de esta tecnología comenzó en 1872 con la instalación de una gran destilador solar de batea cerca de Las Salinas, norte de Chile (Tiware y Sahota, 2017). Este tipo de destiladores han sido ampliamente estudiados, caracterizándose por su simplicidad y bajo costo. Están conformados por una batea de agua salina de poca profundidad sobre la que se dispone una cubierta transparente de vidrio o plástico. La radiación solar atraviesa la cubierta y después es absorbida por el agua y el fondo de la batea, con el subsiguiente calentamiento y evaporación del líquido. El vapor formado asciende y se condensa en la superficie interior de la cubierta desde donde se desliza hasta caer en un canal que lo conduce fuera de la unidad. Aunque estos sistemas son económicos y de fácil construcción tienen una baja producción de agua y su cubierta de vidrio es propensa a sufrir daños.

La eficiencia de los destiladores solares de batea se puede incrementar al suministrarse una cantidad adicional de energía térmica procedente de colectores solares o del calor desechado por motores y procesos industriales (Tiware y Tiware, 2008). En 1976, Soliman fue el primero en investigar el uso de un colector solar plano integrado a un destilador solar de batea, obteniendo un incremento significativo en la cantidad de agua producida. Más recientemente, Schwarzer et al. (2009) desarrollaron un destilador solar de múltiples etapas que puede trabajar con un colector solar plano, de tubos al vacío o parabólico acoplado a una torre de destilación. Los resultados indican que el dispositivo produce entre 15 y 18 kg por m<sup>2</sup> de área del colector, cantidad 5 a 6 veces superior a la producción de un destilador solar de batea convencional.

Feilizadeh et al. (2015) investigaron el rendimiento de un destilador solar de múltiples etapas tipo batea conectado a un colector solar plano, así como el efecto de la relación entre el área del colector y el área de la batea ( $A_c/A_b$ ). Con un  $A_c/A_b$  de 3.45 la producción diaria del destilador solar varía entre a 3.35 y 5.03 kg por m<sup>2</sup> de área del colector. Reddy y Sharon (2016) analizaron de forma teórica el desempeño de un desalinizador solar activo, conformado por una torre de destilación de múltiples etapas de tipo vertical conectada a un colector solar plano. La torre de destilación puede operar a presión atmosférica o en vacío para incrementar el destilado generado. De acuerdo a los cálculos, a presión atmosférica (1 bar) el dispositivo tendría una

producción anual promedio de 6.78 kg por m<sup>2</sup> de área de colector. Mientras que a una presión de 0.25 bar el destilado generado aumentaría a 17.92 kg por m<sup>2</sup> de área de colector.

En esta revisión se puede notar que existe una gran variación en los resultados obtenidos por diferentes investigadores, por lo que aún existe espacio para desarrollar y probar sistemas solares de desalinización de múltiples etapas en las que se maximice la producción de agua sin recurrir a procesos que incrementan el costo y complejidad de los equipos, como es el caso de la generación de vacío. En este artículo se presenta un desalinizador solar que consta de una torre de destilación de 3 etapas acoplada a un colector solar plano. La energía del colector es transferida a la torre de destilación en la que por medio de un proceso de evaporación y condensación se recupera la energía en cada etapa, incrementándose la producción de agua destilada. El diseño modular del desalinizador permite variar la producción de agua de acuerdo a las necesidades y el número de usuarios, desde unos cuantos litros hasta más de 1 metro cúbico al día. El prototipo tiene muy pocas partes móviles, por lo que puede ser armado y desarmado rápidamente con herramientas básicas y de fácil adquisición, lo que simplifica considerablemente su operación y mantenimiento.

Aunque los colectores solares planos alcanzan temperaturas más bajas que otros tipos de colectores tienen la ventaja de presentar un diseño más simple y menores costos de mantenimiento y, por lo tanto, son los equipos más utilizados en sistemas solares de calentamiento en el sector industrial y residencial (Cando et al., 2020). Por este motivo, y dado que la tecnología se adapta bien a las temperaturas de destilación del agua (menores a 100 °C), el uso de colectores planos es conveniente en aplicaciones de desalinización.

## **2. Materiales y métodos**

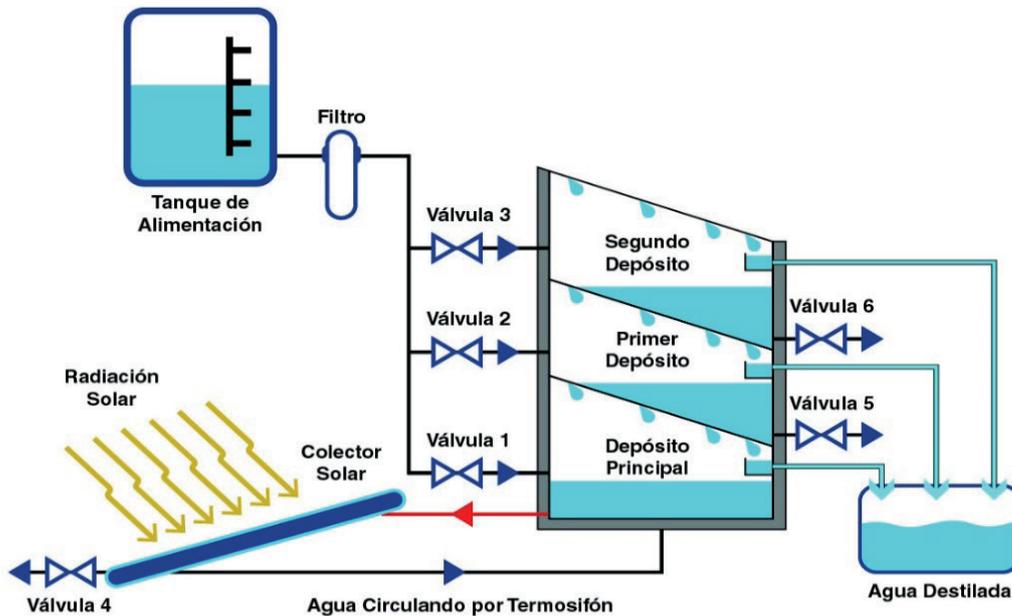
### ***2.1. Descripción del equipo desarrollado***

En el esquema de la Figura 1 se indica un diagrama esquemático del prototipo desarrollado. Las partes principales del sistema son una torre de destilación de 3 etapas, un colector solar plano que opera por termosifón y un tanque de alimentación. La torre de destilación está compuesta por un conjunto de depósitos de agua colocados uno encima de otro. El compartimiento inferior, denominado depósito principal, recibe energía del colector solar, generándose vapor que se condensa en el fondo del siguiente depósito, transfiriendo su calor de condensación; circunstancia que permite evaporar más agua sin requerimientos adicionales de energía. Este proceso se repite en los depósitos restantes, incrementándose considerablemente la cantidad de líquido generado en relación a un dispositivo de una sola etapa. Al igual que en un destilador de batea convencional, el condensado producido en cada compartimiento fluye hasta un canal que lo dirige fuera de la unidad. El tanque de alimentación suministra el agua de reposición a los depósitos mediante válvulas de flotador.

Para evitar problemas de corrosión los depósitos fueron construidos con lámina de acero inoxidable AISI 430 de 0.9 mm de espesor, mientras que las tuberías del colector solar son de aleación Cu-Ni 90/10 resistentes a la corrosión por agua salina. Las elevadas temperaturas que deben alcanzarse durante la destilación del agua, especialmente en el depósito principal, determinaron que en esta investigación se utilice un colector solar plano de alta eficiencia con superficie selectiva. El colector solar tiene un área total de 2 m<sup>2</sup> (1.76 m<sup>2</sup> de área efectiva) que

corresponde al área más comúnmente utilizada en sistemas solares comerciales de calentamiento de agua.

**Figura 1.** Esquema del desalinizador solar de 3 etapas con colector plano



## 2.2. Modelo térmico del sistema

### 2.2.3 TORRE DE DESTILACIÓN

Dentro de cada etapa de la torre de destilación la transferencia de calor entre el agua y el fondo del depósito situado arriba se da por convección, evaporación y radiación. El flujo de calor por evaporación depende en gran medida del fenómeno de convección, ya que gracias a este último, el vapor asciende hasta la superficie de condensación. La torre de destilación intercambia calor con el medio ambiente, principalmente por convección, conducción y radiación. Además de estos flujos de calor, el sistema libera energía hacia el exterior a medida que el destilado abandona los compartimientos y es remplazado por el agua proveniente del tanque de alimentación. Un esquema de la torre de destilación con todos sus flujos de calor se presenta en la Figura 2.

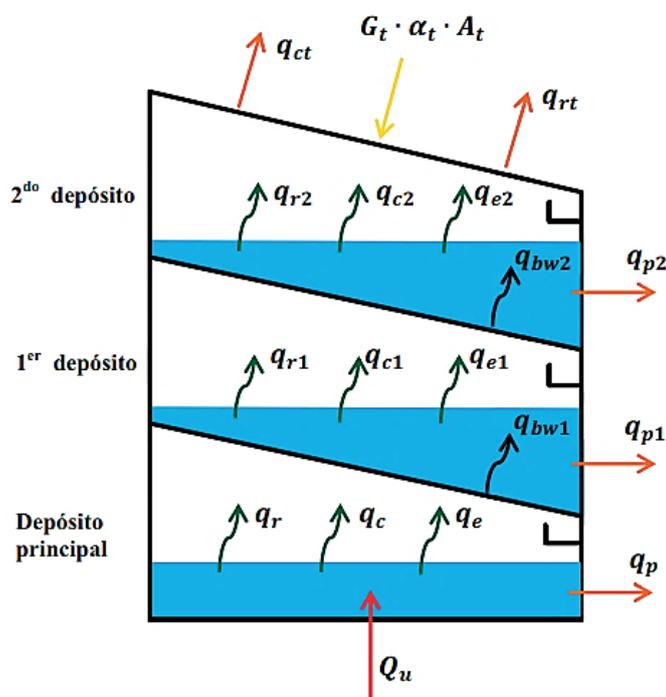
Los balances de energía en la torre de destilación se elaboraron cumpliendo con las siguientes suposiciones:

- No existe gradiente de temperatura en el agua de cada depósito.
- El destilado abandona el equipo a la temperatura del agua en los depósitos.
- El agua de alimentación ingresa a la torre de destilación a temperatura ambiente.

El balance de energía en el depósito principal puede expresarse como:

$$m_w \cdot C_{pw} \cdot \frac{dT_w}{dt} = Q_u - q_r - q_c - q_e - \dot{m}_e \cdot C_{pw} \cdot (T_w - T_a) \quad (1)$$

Figura 2. Flujos de calor en la torre de destilación



El agua del depósito principal ( $m_w$ ) recibe la energía proveniente del colector solar ( $Q_u$ ), libera energía hacia el medio ambiente a través de las pérdidas de calor ( $q_p$ ) y la salida del destilado ( $\dot{m}_e$ ). Adicionalmente, intercambia calor con el fondo del primer depósito mediante radiación ( $q_r$ ), convección ( $q_c$ ) y evaporación ( $q_e$ ).

El balance de energía en el fondo del primer depósito puede expresarse como:

$$m_{b1} \cdot C_{pb} \cdot \frac{dT_{b1}}{dt} = q_r + q_c + q_e - q_{bw1} \quad (2)$$

El fondo del primer depósito ( $m_{b1}$ ) recibe energía del agua del depósito principal mediante radiación ( $q_r$ ), convección ( $q_c$ ) y evaporación ( $q_e$ ). Y transfiere calor por convección ( $q_{bw1}$ ) al agua del primer depósito. Los balances de energía restantes son similares a los de las ecuaciones anteriores y pueden ser fácilmente deducidos de la Figura 2. Adicionalmente, la cubierta del segundo depósito absorbe la radiación solar ( $G_t$ ), intercambia calor por radiación con el cielo ( $q_{rt}$ ) y libera calor hacia el medio ambiente por convección ( $q_{ct}$ ).

La evaluación de los flujos de calor por evaporación dentro de la torre de destilación es una tarea muy importante, pues estos determinan la cantidad de agua producida por el desalinizador solar. Debido a que la evaporación depende de la convección, ambos fenómenos deben ser analizados para estimar la producción de agua del equipo. El flujo de calor por convección natural entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito se calcula con la ecuación general:

$$q_c = A_w \cdot h_c \cdot (T_w - T_{b1}) \quad (3)$$

Donde  $h_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) y  $T_{b1}$  la temperatura del fondo del primer depósito. Con el fin de evaluar  $h_c$  se emplean cuatro parámetros adimensionales: el número de Nusselt ( $Nu$ ), el número de Grashof ( $Gr$ ), el número de Prandtl ( $Pr$ ) y el número de Rayleigh ( $Ra$ ). Estos están dados por las formulaciones:

$$Nu = \frac{h_c \cdot x}{k} \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot x^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (6)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (7)$$

Para el flujo de calor por convección natural en espacios cerrados horizontales con aire es común el uso de la siguiente relación (Sampathkumar et al., 2010; Tiwari y Sahota, 2017):

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n = C(Ra)^n \quad (8)$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes que dentro del intervalo  $3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7$ , correspondiente a un flujo turbulento (condición predominante dentro de la torre de destilación); Dunkle (1961) utiliza los valores:  $C = 0.075$  y  $n = 1/3$ .

El factor de empuje  $\beta \cdot \Delta T$  de la ecuación 5 tiene que ser modificado para tener en cuenta la variación de la humedad del aire a lo largo de su ascenso (Abdullah et al., 2020; Parsa et al., 2020), obteniéndose:

$$\beta \cdot \Delta T' = \left[ \frac{T_w - T_{b1}}{T_{b1} + 273} + \frac{P_w - P_{b1}}{[M_a / (M_a - M_w)] \cdot P_T - P_w} \cdot \frac{T_w + 273}{T_{b1} + 273} \right] \quad (9)$$

Donde  $P_w$  es la presión de vapor del agua a la temperatura del líquido ( $\text{N}/\text{m}^2$ ),  $P_{b1}$  la presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del primer depósito,  $P_T$  la presión total o atmosférica,  $M_a$  el peso molecular del aire y  $M_w$  el peso molecular del agua.

Igualando las ecuaciones 4 y 8 y luego despejando  $h_c$  se obtiene:

$$h_c = \frac{C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot k}{x} \quad (10)$$

El flujo de calor por evaporación entre el agua y el fondo del primer depósito se establece por:

$$q_e = \dot{m}_e \cdot h_{fg} \quad (11)$$

De acuerdo a Tiwari y Tiwari (2008), el flujo de calor por evaporación entre la superficie del agua y el fondo del primer depósito está dado por:

$$q_e = 0.016273 \cdot h_c \cdot (P_w - P_{b1}) \quad (12)$$

Al igualar las ecuaciones 11 y 12 y despejando  $\dot{m}_e$  se llega a la siguiente formulación:

$$\dot{m}_e = \frac{0.016273 \cdot A_w \cdot h_c \cdot (P_w - P_{b1})}{h_{fg}} \quad (13)$$

Cuando Dunkle (1961) analizó el funcionamiento de un destilador solar de batea empleó los valores de  $C = 0.075$  y  $n = 1/3$  para evaluar el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_c$ . No obstante, este modelo posee las siguientes limitaciones (Rahbar y Esfahani, 2013):

- Solo es válido para un rango de temperatura de entre 55 y 70 °C, y una diferencia media de temperatura entre las superficies de evaporación y condensación de 11 °C.
- Es independiente de la distancia entre las superficies de evaporación y condensación (a menor distancia mayor flujo de calor).
- Es bueno para estimar el flujo de calor hacia arriba en espacios cerrados horizontales con aire, pero no toma en cuenta la inclinación de la superficie de condensación ni el fenómeno de evaporación.

Para contrarrestar estas limitaciones se utilizó un método que se basa en hallar los valores de  $C$  y  $n$  mediante regresión lineal simple a partir de datos experimentales que deben ser obtenidos durante condiciones normales de operación. El procedimiento de cálculo es el siguiente (Tiwari y Sahota, 2017):

Al remplazar la ecuación 10 en la ecuación 13 y multiplicar por 3 600 para obtener el destilado producido en 1 hora resulta:

$$\dot{m}_e' = \frac{0.016273 \cdot (P_w - P_{b1}) \cdot k \cdot 3600 \cdot C \cdot (Ra)^n}{x \cdot h_{fg}} \quad (14)$$

Si una parte de la ecuación anterior se sustituye por  $R$ :

$$R = \frac{0.016273 \cdot (P_w - P_{b1}) \cdot k \cdot 3600}{x \cdot h_{fg}} \quad (15)$$

La ecuación 14 queda como:

$$\dot{m}_e' = R \cdot C \cdot (Ra)^n \quad (16)$$

Al pasar  $R$  al otro lado de la ecuación se tiene:

$$\frac{\dot{m}_e'}{R} = C \cdot (Ra)^n \quad (17)$$

La ecuación 17 puede escribirse de la siguiente manera:

$$Y = a \cdot (X)^b \quad (18)$$

Donde:  $\dot{m}_e'/R = Y$ ,  $C = a$ ,  $Ra = X$ ,  $n = b$

Aplicando el logaritmo en ambos lados de la ecuación 18 se produce:

$$\ln(Y) = \ln(a) + b \cdot \ln(X) \quad (19)$$

Por simplicidad, la ecuación anterior se escribirá de otra manera:

$$y' = a' + b' \cdot x' \quad (20)$$

$$\text{Donde: } y' = \ln(Y), a' = \ln(a), b' = b, x' = \ln(X)$$

Los coeficientes  $a'$  y  $b'$  de la ecuación 20 se calculan por regresión lineal simple, operación que puede ser efectuada directamente en un computador o de forma manual con la ayuda del método de los mínimos cuadrados. Después de obtener  $a'$  y  $b'$  el cálculo de  $C$  y  $n$  es muy fácil con las ecuaciones:

$$C = e^{(a')} \quad (21)$$

$$n = b' \quad (22)$$

Los valores de  $C$  y  $n$  derivados de este procedimiento toman en consideración la distancia entre la superficie del agua y el fondo del primer depósito, la inclinación de este último y el rango de las temperaturas de operación.

#### 2.2.4 COLECTOR SOLAR

Para facilitar y mejorar la exactitud del cálculo de la energía suministrada por el colector solar ( $Q_u$ ) es necesario conocer la curva de rendimiento de este equipo. Sin embargo, al no disponer de esta información la estimación de  $Q_u$  se realizó con un método descrito por Duffie y Beckman (2013) y Kalogirou (2014). Dicho método es muy efectivo y de fácil aplicación. Se basa en la variación constante de la temperatura del agua al circular por un colector solar plano, característica que bajo un amplio rango de condiciones se presenta en muchos sistemas de circulación natural (termosifón). Las ecuaciones para calcular  $Q_u$  son:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_e) = \dot{m} \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_f \quad (23)$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de agua que circula por el colector (kg/s),  $T_e$  y  $T_s$  son la temperatura del fluido al ingreso y salida del colector, respectivamente. El flujo  $\dot{m}$  está dado por:

$$\dot{m} = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c}{C_{pw} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{U_L (T_s - T_e)}{S \cdot U_L (T_e - T_a)} \right]} \quad (24)$$

Siendo  $F'$  el factor de eficiencia del colector y  $S$  la radiación total absorbida ( $W/m^2$ ). La aplicación de la ecuación 24 requiere del conocimiento de  $T_s - T_e$ , valor constante que fue determinado experimentalmente.

#### 2.2.5 COEFICIENTE DE RENDIMIENTO (COP) Y RELACIÓN DE GANANCIA DE SALIDA (GOR)

El COP y GOR son parámetros importantes al momento de evaluar el desempeño y la eficiencia de los destiladores de múltiples etapas (Al-Mutaz y Wazeer, 2014; Schwarzer et al., 2011; Xue et al., 2018). El COP es la relación entre la masa de agua entregada por todas las etapas y la producida en la primera etapa del desalinizador. Este parámetro es un indicativo de la efectividad del proceso de recuperación de calor en la torre de destilación y se utiliza para optimizar la producción en cada una de sus etapas. Su ecuación es la siguiente:

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ei}}{m_{e1}} \quad (25)$$

Siendo  $\sum_{i=1}^n m_{ei}$  el agua producida por todas las etapas y  $m_{e1}$  el agua generada por la primera. El GOR es la relación entre la energía necesaria para evaporar toda el agua producida y la energía suministrada por el colector solar, resulta útil al analizar el desempeño general del desalinizador, y es equivalente a la eficiencia térmica. Su expresión es:

$$GOR = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ei} \cdot \overline{h_{fg}}}{Q_{u,total}} \quad (26)$$

Donde  $\overline{h_{fg}}$  es la entalpia promedio de vaporización del agua (J/kg) y  $Q_{u,total}$  la energía total suministrada por el colector solar (J).

### 2.2.6 SIMULACIÓN

La simulación del desalinizador solar se realizó con el programa Matlab/Simulink con los datos de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar para un periodo de 24 horas. El propósito de la simulación es predecir la masa de agua destilada generada por el desalinizador. Esto se consigue con la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales que definen los balances de energía en la torre de destilación, en la que la variable principal es la temperatura del agua en cada depósito. La simulación posee una ventana principal en la que se encuentran los bloques correspondientes a todas las etapas de la torre de destilación, estos a su vez están conectados a pequeños recuadros que indican las temperaturas que se desean conocer. Dentro del bloque de cada etapa se localizan otros bloques que sirven para evaluar todas las variables termofísicas necesarias para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales.

En la Figura 3 se presentan los bloques de la ventana principal y los recuadros correspondientes a las temperaturas de las superficies de evaporación y condensación de la torre de destilación. Los bloques pertenecientes a los flujos de calor y masa del depósito principal se muestran en la Figura 4. Cada bloque se relaciona con los demás por medio de operadores matemáticos que permiten representar a los balances de energía en el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito.

## 3. Resultados y discusión

Las pruebas al desalinizador solar se efectuaron durante diciembre del año 2018 y enero del 2019 en las instalaciones del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) en la sede Monteserrín de la ciudad de Quito. Los datos de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento fueron suministrados por una estación meteorológica marca Nipon modelo HG4050, instalada en la azotea del edificio en el que se probó el prototipo. Las variables que se midieron fueron la temperatura del agua en los depósitos de la torre de destilación, la masa de agua destilada generada por cada depósito y la temperatura del líquido a la entrada y salida del colector. Las pruebas del desalinizador no pudieron efectuarse en un lugar de la costa del Ecuador o las Islas Galápagos por problemas logísticos, principalmente, ya que las personas a cargo no podían movilizarse a estos sitios por el periodo de tiempo que tomarían las pruebas. Adicionalmente, la estación meteorológica, componente muy importante del estudio, no podía ser trasladada fuera de las instalaciones del IIGE.

Figura 3. Ventana principal del programa de simulación del desalinizador solar

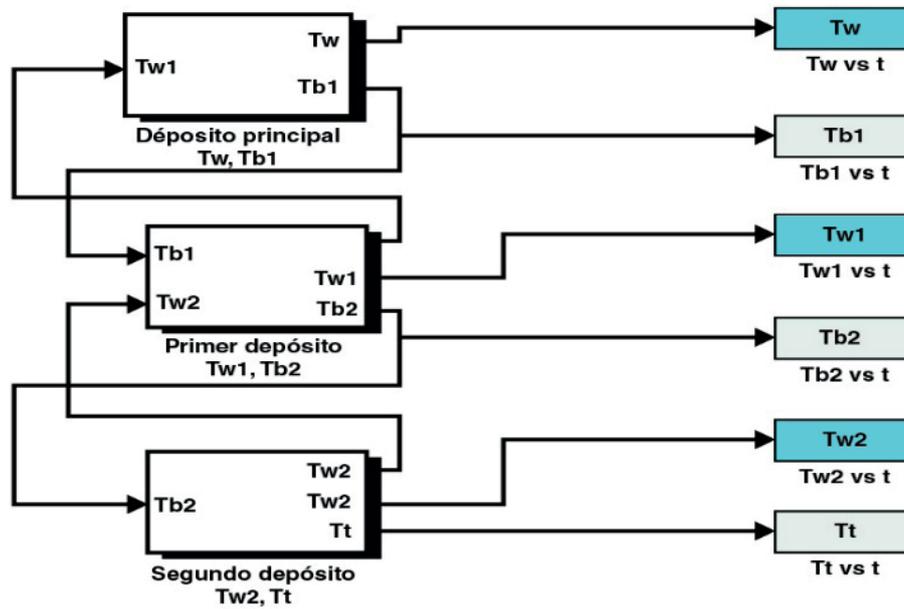
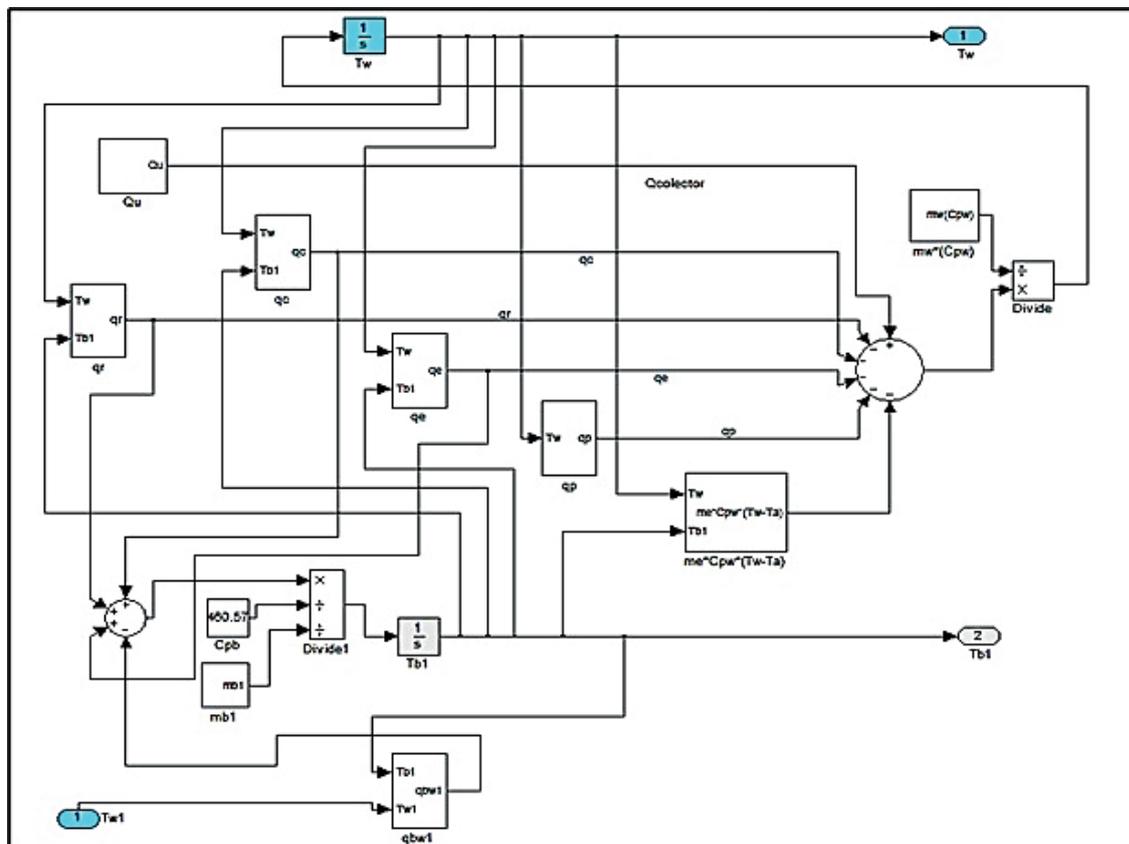


Figura 4. Bloques de la simulación para los flujos de calor y masa en el depósito principal



La Figura 5 muestra el prototipo instalado en el que se observa que el sistema consta de un colector solar plano de 1.76 m<sup>2</sup>, una torre de destilación de 3 etapas, un tanque de alimentación de 120 litros y un filtro colocado entre el tanque y la torre.

Para facilitar el proceso, la mayor parte de pruebas se efectuaron con agua potable. Los resultados de estos experimentos luego fueron modificados tomando en cuenta los valores obtenidos en las pruebas con agua salina. Las mediciones de temperatura del agua en los depósitos se efectuaron cada 15 minutos durante 6 días no consecutivos, desde las 9:00 hasta las 17:00. Al mismo tiempo se midió cada hora la masa de destilado producido en los compartimientos, cuantificando también la masa acumulada desde las 17:00 hasta las 9:00 del día siguiente. Con los datos adquiridos se promedió la temperatura del líquido para periodos de una hora. La adquisición de información se realizó únicamente hasta las 17:00, ya que a partir de esa hora no se tenía acceso a la azotea del edificio en el que se instaló el desalinizador. Los datos de temperatura y masa de agua producida se utilizaron para determinar las constantes  $C_i$  y  $n_i$  de los coeficientes de transferencia de calor por convección entre la superficie del agua y la superficie de condensación en los dos primeros depósitos del desalinizador.

Debido a que únicamente se midió la temperatura del líquido en los depósitos, la obtención de las constantes  $C_i$  y  $n_i$  por medio del método descrito por Tiwari y Sahota (2017) se llevó a cabo suponiendo que no existe diferencia de temperatura entre el agua y el fondo en cada depósito. La validez de esta afirmación es razonable, ya que la transferencia de calor es lenta entre el fondo y el agua de los compartimientos, presentándose un gradiente muy pequeño de temperatura.

**Figura 5.** Desalinizador solar en funcionamiento



En la Tabla 1 se indican las temperaturas promedio del agua y la masa del destilado producido en cada compartimiento para un día de medición con una radiación solar de 5 436.63 Wh/m<sup>2</sup>/día. Como era de esperarse, las mayores temperaturas se alcanzan en el depósito principal (máxima de 74 °C entre las 12:00 y 13:00) y las más bajas en el segundo depósito, obteniéndose valores intermedios en el primero. Algo similar ocurre con la producción de agua destilada, en la que de un total de 5.967 kg, 2.665 kg (44.7 %) son generados en el depósito principal, 1.994 kg (32.6 %) en el primer depósito y 1.358 kg (22.8 %) en el segundo depósito. Este comportamiento es típico del funcionamiento de una torre de destilación con múltiples etapas en la que la recuperación de calor va disminuyendo en las subsiguientes etapas o depósitos. Estos porcentajes se mantuvieron relativamente constantes durante todas las pruebas del prototipo, a excepción de ciertas condiciones de operación en las que la producción de agua fue muy baja o los niveles de radiación solar fueron muy irregulares en el transcurso del día. En términos generales, en el depósito principal y primer depósito se genera la mayor parte del destilado en la mañana y en la tarde. Mientras que en el segundo depósito casi la totalidad del destilado se produce en la noche y en la madrugada.

**Tabla 1.** Temperatura promedio del agua y masa del destilado generado en cada depósito.

22/12/2018						
Hora (h)	$T_w$ (°C)	$T_{w1}$ (°C)	$T_{w2}$ (°C)	Destilado producido, $m_e$ (kg)		
				Depósito principal	Primer depósito	Segundo depósito
9-10	46.2	32.1	26.5	0.116	0.021	0.000
10-11	59.4	36.6	27.6	0.360	0.051	0.005
11-12	69.1	45.2	30.5	0.621	0.138	0.000
12-13	74.0	54.5	35.3	0.727	0.270	0.002
13-14	70.2	58.2	40.6	0.359	0.300	0.041
14-15	66.5	57.9	44.4	0.210	0.231	0.080
15-16	61.3	55.9	45.6	0.086	0.156	0.091
16-17	58.3	53.8	45.6	0.052	0.112	0.115
17-9	-	-	-	0.134	0.665	1.024
Subtotales				2.665	1.944	1.358
Total				5.967		

Las constantes  $C_i$  y  $n_i$  obtenidas experimentalmente son: depósito principal ( $C = 0.0273$ ,  $n = 0.4156$ ) y primer depósito ( $C_1 = 0.07056$ ,  $n_1 = 0.3615$ ). La evaluación de  $C_2$  y  $n_2$  no fue posible, ya que la generación de agua en el segundo depósito se presentaba principalmente en la noche, periodo en el cual no se podía recolectar información. En la Tabla 2 se comparan los datos experimentales de agua producida en el depósito principal con los valores calculados a partir de las constantes obtenidas experimentalmente y de las propuestas por Dunkle. Existe una buena aproximación entre los datos reales y los calculados a partir de las constantes evaluadas experimentalmente, con un error máximo del 9.18 % en el depósito principal y del 4.81 % en el primer depósito. Por el contrario, cuando se emplearon las constantes propuestas por

Dunkle ( $C = 0.075$  y  $n = 1/3$ ) el error fue mucho mayor, subestimándose hasta en un 26.13 % la masa de destilado producido.

Durante la operación del desalinizador se determinó que la variación en la temperatura del agua a su paso por el colector solar es de aproximadamente 33 °C. Esta variación de temperatura es mucho mayor que la esperada, lo que sugiere la existencia de una restricción considerable en el flujo de agua que circula entre la torre de destilación y el colector solar, situación que podría provocar una disminución en la eficiencia del colector. El uso de este valor para calcular la energía suministrada por el colector es válido con niveles medios y altos de radiación solar (500 a 1000 W/m<sup>2</sup>). Cuando la radiación es muy baja o se presentan cambios bruscos en su intensidad, el aumento de temperatura es más inestable y de menor magnitud.

**Tabla 2.** Depósito principal: comparación entre la masa de destilado experimental y la teórica.

22/12/2018					
Hora (h)	$m_e$ (kg) Exp.	$C = 0.0273$ $n = 0.4156$		$C = 0.075$ $n = 1/3$	
		$m_e$ (kg) Teórico	Error (%)	$m_e$ (kg) Teórico	Error (%)
9-10	0.116	0.119	2.59	0.095	-18.10
10-11	0.360	0.390	8.33	0.295	-18.05
11-12	0.621	0.678	9.18	0.505	-18.70
12-13	0.727	0.716	-1.51	0.537	-26.13
13-14	0.359	0.349	-2.79	0.273	-24.00
14-15	0.210	0.193	-8.10	0.156	-25.71
15-16	0.086	0.082	-4.65	0.069	-19.76
Total	2.479	2.527	1.94	1.93	-22.15

En la Tabla 3 se presentan los resultados generales de un día de operación del prototipo con agua potable. La energía entregada por el colector ( $Q_u$ ) se calcula con las ecuaciones 23 y 24. El valor de  $Q_u$  es igual a 3031.779 Wh, con una eficiencia del colector del 31.68 %. Pese a que los niveles de radiación solar son elevados, la eficiencia del colector es relativamente baja. Condición que puede atribuirse en parte a la mencionada restricción de flujo, así como a las altas temperaturas y ausencia de estratificación térmica en el agua del depósito principal (muy pequeña altura de líquido). Una forma de compensar este problema consistiría en aumentar la distancia vertical entre el colector solar y la torre de destilación, modificación que incrementaría el flujo de agua y, por ende, también la eficiencia del colector.

La Tabla 4 muestra los datos de radiación solar, destilado producido, COP y GOR para todos los días de pruebas al desalinizador con agua potable. Los valores de COP y GOR se mantuvieron relativamente constantes durante todas las pruebas. Un COP promedio de 2.17 muestra que el proceso de recuperación de calor en la torre de destilación es muy efectivo. Por ejemplo, si el destilador tuviera una sola etapa la producción de agua probablemente se reduciría a la mitad. El GOR promedio es de 1.24, un valor muy bajo en comparación con el GOR del prototipo desarrollado por Schwarzer et al. (2009) que varía entre 2.8 y 3.5 con un destilador de 5 y 7 etapas, respectivamente. Aunque el equipo de la presente investigación tiene menos etapas y un colector solar de menor eficiencia no debería existir una diferencia tan significativa en el

GOR. La gran inercia térmica del equipo, con cerca de 30 litros de agua en cada depósito puede ser una de las principales razones de que el GOR obtenido sea tan bajo, ya que una cantidad considerable de energía se destina únicamente a elevar la temperatura del agua. Esto es más evidente en el depósito principal, en el que a pesar de que la temperatura del agua a las 17:00 puede alcanzar los 58 °C la producción de destilado es mínima después de esa hora, desperdiándose prácticamente toda la energía almacenada a esa temperatura.

Con la finalidad de conocer el efecto sobre su desempeño, el equipo funcionó 48 horas con agua salina. El líquido se preparó con agua potable y 3.6 % en peso de sal en grano, porcentaje equivalente a la salinidad promedio del agua de mar (El-Dessouky y Ettouney, 2002). El COP, GOR y destilado producido se redujeron en casi el 20 % respecto al uso de agua potable. Estos resultados son similares a los obtenidos por Reddy et al. (2012), quienes al utilizar agua salina en un desalinizador de múltiples etapas con operación por difusión observaron una disminución de aproximadamente el 20 % en el destilado producido.

**Tabla 3.** Resultados de un día de operación del prototipo

22/12/2018 (agua potable)	
Radiación total diaria	5436.63 Wh/m <sup>2</sup>
Energía entregada por el colector ( $A_c = 1.76 \text{ m}^2$ )	3031.779 Wh
Eficiencia del colector	31.68 %
Destilado producido	5.97 L
Destilado/área del colector	3.4 L/m <sup>2</sup>
COP	2.24
GOR	1.3

**Tabla 4.** Principales parámetros de operación durante las pruebas al desalinizador

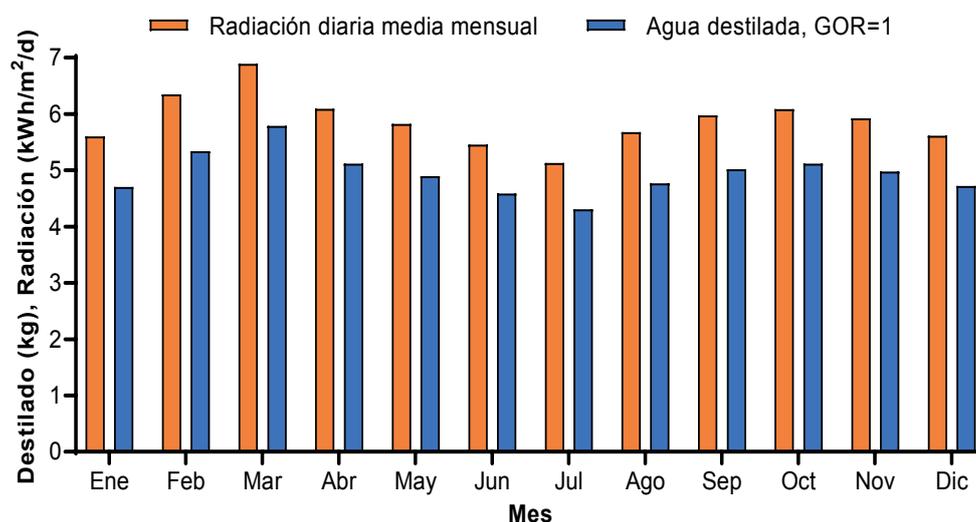
Fecha	Radiación solar diaria (Wh/m <sup>2</sup> )	Agua destilada D. principal (kg)	Agua destilada Total (kg)	COP	GOR
21/12/2018	6310.59	3.093	6.451	2.09	1.22
22/12/2018	5436.63	2.665	5.967	2.24	1.30
03/01/2019	3587.37	1.557	3.540	2.27	1.17
16/01/2019	5056.02	2.574	5.351	2.08	1.26
Promedio				2.17	1.24

El GOR y la radiación solar son los principales parámetros que permiten determinar la producción de agua que tendría el desalinizador solar en un lugar diferente al sitio de estudio (Quito), vale mencionar que la temperatura ambiente y la presión atmosférica tienen un papel secundario. Bajo este criterio, y tomando en cuenta el efecto del agua salina en el desempeño del equipo, la Figura 6 muestra la radiación solar y la producción diaria promedio que tendría el prototipo a lo largo del año en Puerto Ayora, la ciudad más poblada de las Islas Galápagos. Los valores de radiación total promedio sobre una superficie horizontal se obtuvieron de NASA Langley Research Center (2020) para un periodo de 2 años (2018-2019). La radiación diaria media mensual es alta durante todo el año, superando en todos meses los 5 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que

favorece la aplicación de la desalinización solar como medio complementario para satisfacer las demandas de agua potable en esta localidad. El destilado diario promedio a lo largo del año oscila entre los 4.3 y 5.8 kg —es decir, 2.44 y 3.29 L/m<sup>2</sup> de área del colector— cantidad relativamente pequeña, tan sólo un poco superior a la producción de un destilador solar de batea convencional. Por este motivo, se utilizó la simulación del desalinizador para analizar modificaciones que permitan mejorar su desempeño e incrementar la producción de agua.

En la simulación se usaron las constantes  $C$ ,  $n$ ,  $C_1$  y  $n_1$  evaluadas experimentalmente, con la particularidad de que en el segundo depósito, al no disponerse de las mismas, se aplicaron las constantes del primer depósito. La producción total del desalinizador solar en el día 22 de diciembre de 2018 fue de 5.97 kg, mientras que la masa calculada por la simulación fue de 6.43 kg, con una diferencia del 7.7 % entre ambos resultados. Existe una buena aproximación entre los datos experimentales y la simulación pese a que se tuvo una mayor incertidumbre al calcular la energía entregada por el colector solar sin su curva de eficiencia.

**Figura 6.** Variación mensual de la producción diaria de agua y radiación solar (Puerto Ayora, Galápagos)

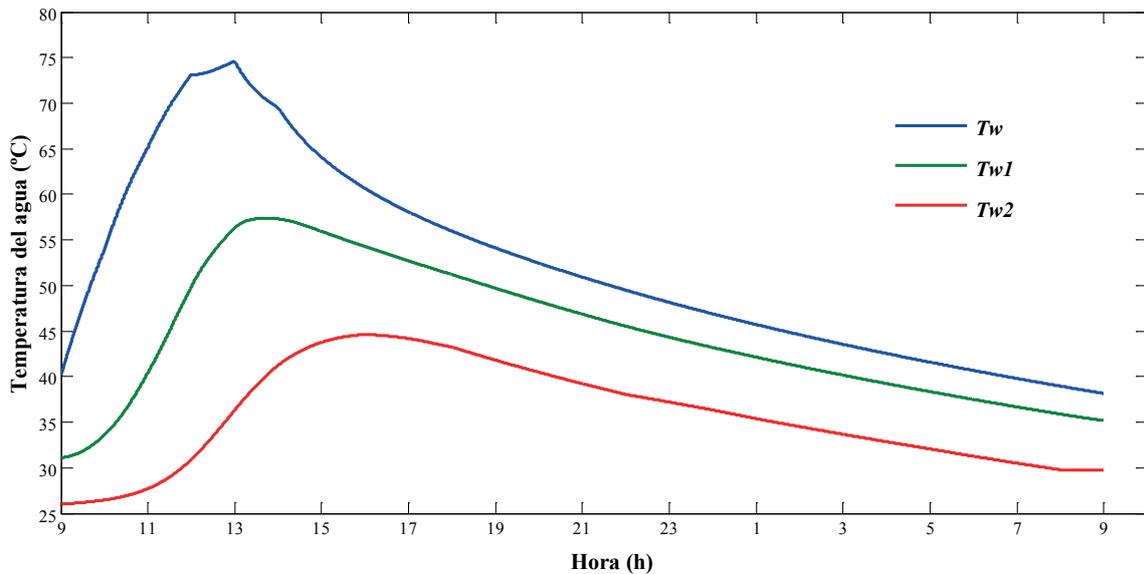


Al correr la simulación con las constantes utilizadas por Dunkle ( $C = 0.075$  y  $n = 1/3$ ) en todos los depósitos el destilado acumulado fue de 5.65 litros, con una diferencia del -5.2 % con los datos experimentales. Este resultado indica que la simulación corrige significativamente el error cuando se utilizan las constantes propuestas por Dunkle. Una posible explicación de este fenómeno consiste en que el uso de los coeficientes de Dunkle ocasionarían una reducción anormal de los flujos de calor por evaporación, lo que a su vez provocaría un aumento en la temperatura del agua en los depósitos, incrementándose la tasa de producción de agua y compensándose el error.

En la Figura 7 se muestra la simulación de la temperatura del agua en cada depósito del desalinizador para un periodo de 24 horas de operación. Los perfiles de temperatura del depósito principal concuerdan muy bien con los datos experimentales con una diferencia máxima de 1.6 °C. En el primer depósito ocurre algo similar con una variación máxima de 1.7 °C entre las temperaturas de la simulación y los valores experimentales. En el segundo depósito la concordancia con los datos experimentales es menos exacta y aunque la diferencia no supera los

1.5 °C se mantiene cercana a este valor durante casi las 10 primeras horas de simulación. Este comportamiento puede deberse a que en la simulación se usaron las constantes  $C_1$  y  $n_1$ , tanto para el primer y segundo depósitos.

**Figura 7.** Perfiles de temperatura en el agua de la torre de destilación durante 24 horas de simulación (22/12/2018)



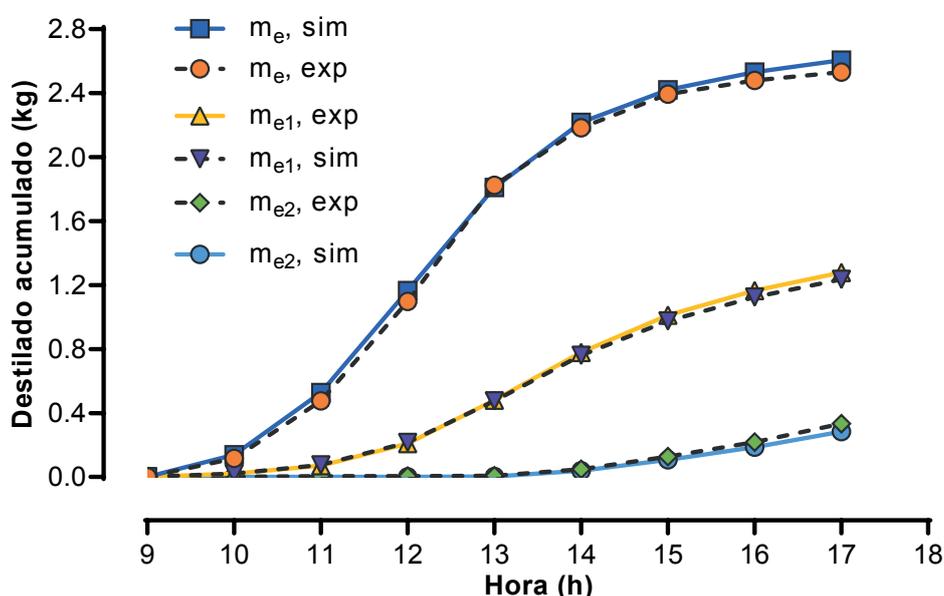
La Figura 8 indica los resultados experimentales y de la simulación sobre la variación horaria del destilado acumulado en cada depósito. Debido a que no se realizaron mediciones después de las 17:00 únicamente se muestran los datos obtenidos desde las 9:00 hasta 17:00 (8 horas). En el depósito principal y primer depósito la simulación predice muy bien la variación en el tiempo de la masa de destilado acumulado. Hasta las 17:00 el error generado por la simulación respecto a los datos experimentales fue del 3 % y -3.5 % en el depósito principal y primer depósito, respectivamente. La simulación es menos exacta para el segundo depósito en el que hasta las 17:00 el error es del -12.3 %. Esta disminución en la exactitud podría deberse al uso de las constantes  $C_1$  y  $n_1$  en este depósito o a la baja producción de agua en ese intervalo de tiempo. Con los resultados de la simulación para un día completo de operación (22/12/2018) se calculó el COP y el GOR, obteniéndose:  $COP_{sim} = 2.15$ ;  $GOR_{sim} = 1.4$ .

De acuerdo a la Tabla 4 el COP y el GOR calculados a partir de los datos experimentales (22/12/2018) son iguales a 2.24 y 1.3, respectivamente. La correspondencia entre resultados de la simulación y los valores experimentales es satisfactoria, con diferencias de únicamente el -4 % para el COP y de 7.7 % para el GOR. Una vez comprobada la validez de la simulación esta se utilizó para el análisis de modificaciones al desalinizador que permitan optimizar la producción de agua. Las mejoras que fueron estudiadas son:

- Sustituir el colector solar plano por un colector de tubos al vacío, equipo más eficiente especialmente con bajos niveles de radiación solar y elevadas temperaturas de operación.

- Incrementar el número de etapas en la torre de destilación, mejorando el proceso de recuperación de calor.
- Disminuir la masa de agua en la torre de destilación mediante el uso de depósitos en forma de V invertida. Con esta modificación la masa total de agua disminuye casi a la mitad. La reducción de la inercia térmica del equipo tendrá un efecto significativo en su desempeño, particularmente en el depósito principal en el que se presentan las temperaturas más elevadas.

**Figura 8.** Simulación y valores experimentales: variación horaria del destilado acumulado en cada depósito (22/12/2018)



En el análisis de mejoras mediante la simulación se usarán las constantes  $C_i$  y  $n_i$  obtenidas experimentalmente con el prototipo de 3 etapas:

Para el depósito principal,  $C = 0.0273$  y  $n = 0.4156$

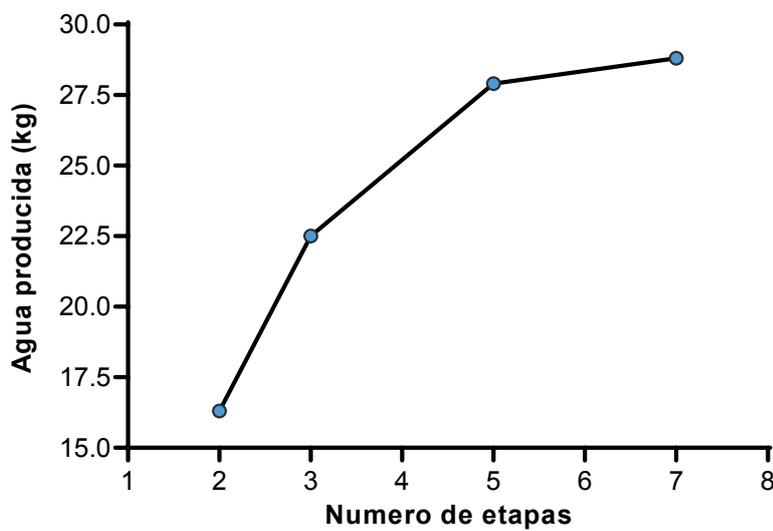
Para el resto de depósitos,  $C_1 = 0.07056$  y  $n_1 = 0.3615$

Las mejoras o modificaciones propuestas tendrían como efecto una variación de las constantes  $C_i$  y  $n_i$  en cada depósito, debiéndose encontrar su valor de forma experimental. Sin embargo, como ya se explicó, la simulación corrige en gran medida el error ocasionado al utilizar unas constantes  $C_i$  y  $n_i$  no evaluadas experimentalmente. Mediante la simulación se determinó que el número óptimo de etapas en la torre de destilación es de 5, ya que, con valores superiores el aumento en la producción de agua destilada es mínimo (Figura 9). Esto es válido para el diseño original y el optimizado con todas las mejoras. Con las modificaciones propuestas, pero utilizándose el colector solar plano, se alcanzó un incremento máximo del 38 % en la producción del desalinizador. Si adicionalmente se utilizan colectores de tubos al vacío la masa de agua destilada generada podría elevarse hasta en un 107 %. Es decir, en Puerto Ayora se tendría una producción anual promedio de 8.9 a 12 kg/d (5.05 a 6.81 L/m<sup>2</sup>). Estos valores son casi dos

veces superiores a la producción que tendría un destilador solar de batea convencional con la ventaja adicional de que el prototipo desarrollado se instalaría de una forma más simple y rápida, ocupando menos espacio.

El diseño modular del sistema y su simplicidad permiten incrementar el número de colectores solares acoplados a la torre de destilación de una forma rápida y sencilla, así como aumentar la cantidad de unidades instaladas, pudiéndose llegar a producir en caso de ser necesario más de 1 m<sup>3</sup> de agua destilada al día.

**Figura 9.** Simulación: variación del destilado producido en función del número de etapas (colector solar de tubos al vacío)



#### 4. Conclusiones

En la actual investigación se desarrolló y probó un desalinizador solar de 3 etapas. El calor latente de condensación se recupera en cada etapa, incrementándose la producción de agua destilada sin el suministro adicional de energía. El prototipo se caracteriza por su modularidad, simplicidad y facilidad de mantenimiento. La relativamente baja producción de agua (4.3-5.8 L/d) es un indicativo de que existen algunos aspectos del prototipo que pueden mejorarse. Entre los que se incluyen: el incremento del número de etapas, la reducción de la masa de agua dentro de la torre de destilación y el reemplazo del colector solar plano por un colector de tubos al vacío de mayor eficiencia.

La costa del Ecuador y las islas Galápagos presentan condiciones favorables para la implementación de la desalinización solar térmica. La escasez de agua dulce, el aislamiento geográfico y los elevados niveles de radiación solar hacen particularmente de Galápagos un lugar muy propicio para el desarrollo de esta tecnología. En Puerto Ayora, la ciudad más poblada de Galápagos, el prototipo tendría una producción diaria promedio de entre 4.3 y 5.8 litros de agua a lo largo del año.

Respecto al uso de las constantes propuestas por Dunkle la exactitud al predecir la producción del desalinizador solar aumenta considerablemente con la obtención experimental de las constantes  $C_i$  y  $n_i$ . No obstante, en la simulación del prototipo, tanto las constantes obtenidas experimentalmente, así como las propuestas por Dunkle, proporcionaron buenos resultados. Los datos de temperatura y destilado producido obtenidos con la simulación tienen muy buena concordancia con los datos experimentales. Esto fue posible gracias a un adecuado modelo matemático del sistema, a la precisa evaluación de las propiedades termofísicas del agua y el aire, a una correcta metodología de cálculo de la energía entregada por el colector solar y al conocimiento de todas las variables meteorológicas necesarias para efectuar la simulación.

El análisis de mejoras al desalinizador por medio de la simulación mostró que la producción total de agua, el COP y el GOR pueden incrementarse un 38, 40 y 50 %, respectivamente. Si adicionalmente se utiliza un colector de tubos al vacío la producción por cada metro cuadrado de colector ( $L/m^2$ ) puede aumentar en un 107 %. Para el desalinizador solar que opera con un colector plano o con un panel de tubos al vacío la simulación determinó que el número óptimo de etapas en la torre de destilación es de 5. Con las mejoras propuestas el prototipo tendría una producción de agua casi 2 veces superior a la de un destilador solar de batea convencional, siendo más fácil de instalar y ocupando la mitad de espacio.

## Nomenclatura

$\Delta T$	Diferencia de temperatura entre la superficie del agua del depósito principal y el fondo del primer depósito ( $^{\circ}C$ )
$A_c$	Área del colector solar ( $m^2$ )
$A_w$	Área de la superficie libre del agua en el Depósito principal ( $m^2$ )
$C$	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito
$C_1$	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del primer depósito y el fondo del segundo depósito
COP	Coefficiente de rendimiento
$C_p$	Calor específico del aire húmedo ( $J/kg \cdot ^{\circ}C$ )
$C_{pb}$	Calor específico del material con el que se construyeron los depósitos del desalinizador solar ( $J/kg \cdot ^{\circ}C$ )
$C_{pw}$	Calor específico del agua ( $J/kg \cdot ^{\circ}C$ )
$F'$	Factor de eficiencia del colector solar
$g$	Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
GOR	Relación de ganancia de salida
$G_r$	Número de Grashof
$G_t$	Radiación solar incidente sobre la cubierta del segundo depósito ( $W/m^2$ )
$h_c$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ )
$k$	Conductividad térmica del aire húmedo en el depósito principal ( $W/m \cdot ^{\circ}C$ )
$\dot{m}$	Flujo másico de agua que circula por el colector solar ( $kg/s$ )

$M_a$	Peso molecular del aire (gr/mol)
$m_{b1}$	Masa del fondo del primer depósito (kg)
$\dot{m}_e$	Flujo másico del agua producida en el depósito principal (kg/s)
$\dot{m}_{e1}$	Flujo másico del agua producida en el primer depósito (kg/s)
$\dot{m}_{e2}$	Flujo másico del agua producida en el segundo depósito (kg/s)
$m_w$	Masa de agua en el depósito principal
$M_w$	Peso molecular del agua (gr/mol)
$n$	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito
$n_1$	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del primer depósito y el fondo del segundo depósito
$Nu$	Número de Nusselt
$P_{b1}$	Presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del Primer depósito (N/m <sup>2</sup> )
$Pr$	Número de Prandtl
$P_T$	Presión total o atmosférica (N/m <sup>2</sup> )
$P_w$	Presión de vapor a la temperatura del agua en el depósito principal (N/m <sup>2</sup> )
$q_{bw1}$	Flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del primer depósito (W)
$q_c$	Flujo de calor por convección entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito (W)
$q_{ct}$	Flujo de calor por convección entre la cubierta del segundo depósito y el medio ambiente (W)
$q_e$	Flujo de calor por evaporación entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito (W)
$q_p$	Calor perdido desde el agua del Depósito principal hacia el medio ambiente (W)
$q_r$	Flujo de calor por radiación entre el agua del depósito principal y el fondo del primer depósito (W)
$q_{rt}$	Flujo de calor por radiación entre la cubierta del segundo depósito y el cielo (W)
$Q_u$	Energía útil entregada por el colector solar (W)
$Ra$	Número de Rayleigh
$S$	Radiación total absorbida por el colector solar (W/m <sup>2</sup> )
$T_a$	Temperatura ambiente (°C)
$T_{b1}$	Temperatura del fondo del primer depósito (°C)
$T_e$	Temperatura del agua a la entrada del colector solar (°C)
$T_s$	Temperatura del agua a la salida del colector solar (°C)
$T_w$	Temperatura del agua en el depósito principal (°C)
$T_{w1}$	Temperatura del agua en el primer depósito (°C)
$T_{w2}$	Temperatura del agua en el segundo depósito (°C)
$U_L$	Coefficiente total de pérdidas del colector solar (W/m <sup>2</sup> ·°C)
$x$	Distancia entre la superficie del agua del depósito principal y el fondo del primer depósito (m)

- $\beta$  Coeficiente de expansión térmica volumétrica del aire húmedo en el depósito principal (1/K)
- $\mu$  Viscosidad dinámica del aire húmedo en el depósito principal (kg/m·s)

## Referencias

- Abdullah, A. S., et al. (2020). Improving the trays solar still performance using reflectors and phase change material with nanoparticles. *Journal of Energy Storage*, 31: 101744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101744>
- Al-Mutaz, I. S., y Wazeer, I. (2014). Comparative performance evaluation of conventional multi-effect evaporation desalination processes. *Applied Thermal Engineering*, 73(1): 1194-1203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.025>
- Buckalew, J. O., James, M., Scott, L., y Reed, P. (1998). Water resources assessment of Ecuador. *US Army Corp of Engineers, Mobile District and Topographic Engineering Center*.
- Cando, A. X. A., Sarzosa, W. Q., y Toapanta, L. F. (2020). CFD Analysis of a solar flat plate collector with different cross sections. *Enfoque UTE*, 11(2): 95-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n2.601>
- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Dunkle, R. V. (1961). Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still, International Developments of Heat Transfer, ASME. In *Proceedings of International Heat Transfer, University of Colorado*, 8(5): 895
- El-Dessouky, H. T., y Ettouney, H. M. (2002). *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Elsevier Science.
- Feilizadeh, M., et al. (2015). Year-round outdoor experiments on a multi-stage active solar still with different numbers of solar collectors. *Applied Energy*, 152: 39-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.084>
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: processes and systems* (Second). Academic Press.
- NASA Langley Research Center. (2020). *POWER Data Access Viewer*. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Parsa, S. M., et al. (2020). First approach on nanofluid-based solar still in high altitude for water desalination and solar water disinfection (SODIS). *Desalination*, 491: 114592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114592>
- Rahbar, N., y Esfahani, J. A. (2013). Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis. *Energy*, 49: 289-297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.023>
- Reddy, K. S., et al. (2012). Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system. *Desalination*, 288: 80-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.016>
- Reddy, K. S., & Sharon, H. (2016). Active multi-effect vertical solar still: Mathematical modeling, performance investigation and enviro-economic analyses. *Desalination*, 395: 99-120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.027>
- Sampathkumar, K., Arjunan, T. V., Pitchandi, P., y Senthilkumar, P. (2010). Active solar distillation. A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6): 1503-1526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.023>
- Schwarzer, K., da Silva, E. V., Hoffschmidt, B., y Schwarzer, T. (2009). A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. *Desalination*, 248(1-3): 204-211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.056>
- Schwarzer, K., da Silva, M. E. V., y Schwarzer, T. (2011). Field results in Namibia and Brazil of the new solar desalination system for decentralised drinking water production. *Desalination and Water Treatment*, 31(1-3): 379-386. <https://doi.org/https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2339>
- Secretaría del Agua (SENAGUA). (2017). *Boletín de la estadística sectorial del agua*.

- Soliman, H. S. (1976). Solar still coupled with a solar water heater. *Mosul University, Mosul, Iraq*, 43.
- Tiwari, G. N., y Sahota, L. (2017). *Advanced Solar-Distillation Systems: Basic Principles, Thermal Modeling and Its Application* (First). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-4672-8>
- Tiwari, G. N., y Tiwari, A. K. (2008). *Solar distillation practice for water desalination systems*. Anshan Pub.
- Xue, Y., Du, X., Ge, Z., y Yang, L. (2018). Study on multi-effect distillation of seawater with low-grade heat utilization of thermal power generating unit. *Applied Thermal Engineering*, 141: 589-599. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.129>

# Telecommuting as a Sustainable Transportation Measure in Ecuador

## *(Teletrabajo como una medida de transporte sostenible en Ecuador)*

Alvaro Corral Naveda<sup>1</sup>

### Abstract

*The purpose of this article is to provide information to determine that telecommuting in Ecuador can be used as a measure of sustainable transport. Briefly, sustainable development is described, and certain definitions and approaches related to sustainable transport are covered, for instance, the Avoid-Shift-Improve (ASI) approach, as well as the Transport Demand Management (TDM), which serve to validate from a conceptual point of view the application and usefulness of telecommuting. An overview of the current situation in the transport sector in Ecuador is analyzed; the final energy demand; the environmental aspects related to transport, and the amount of public and private employees that are telecommuting. Taking into consideration some hypothesis, such as car ownership rate, the total amount of kilometers driven per year, the assumption of the distance travelled by employees who take public transportation; the assumptions helped to determine the savings that can be obtained through telecommuting in the present time. Therefore, these results would provide adequate information for decision makers to establish a conclusive pronouncement on whether or not support telecommuting as a valid working approach, and to develop the necessary policies to maintain it over time.*

### Keywords

*Telecommuting, energy consumption, GHG emissions, policy, sustainable transport.*

### Resumen

El propósito de este artículo es proporcionar información para determinar que el teletrabajo en Ecuador puede utilizarse como una medida de transporte sostenible. Brevemente, se describe el desarrollo sostenible y se cubren determinadas definiciones y enfoques relacionados con el transporte sostenible, como el enfoque Evitar-Cambiar-Mejorar (ASI), así como también la Gestión de la Demanda del Transporte (TDM), las mismas que sirven para validar desde un punto de vista conceptual la aplicación y utilidad de teletrabajo. Se analiza la situación actual del sector transporte en Ecuador; la demanda energética final; los aspectos ambientales relacionados con el transporte y la cantidad de empleados públicos y privados que realizan teletrabajo. Teniendo en cuenta algunas hipótesis como la tasa de propiedad de automóviles, la cantidad total de kilómetros recorridos por año y la suposición de la distancia recorrida por los empleados que toman el transporte público; estas suposiciones ayudaron a determinar los ahorros que pueden obtenerse a través del teletrabajo en la actualidad. Por lo tanto, estos resultados proporcionarían información adecuada para que quienes tomen las decisiones realicen un pronunciamiento concluyente sobre si apoyar o no el teletrabajo como un enfoque válido para laborar y desarrollar las políticas necesarias para mantenerlo en el tiempo.

### Palabras clave

Teletrabajo, consumo de energía, emisiones GEI, política, transporte sostenible.

1 Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito, Ecuador. [alvaro.corral@geoenergia.gob.ec, <https://orcid.org/0000-0002-4936-4281>]

## 1. Introduction

The importance to attain sustainable development is crucial for the progress of countries and inhabitant's improvement quality of life. Thus, telecommuting is a tool that needs to have continuity to evaluate the benefits in the public and private sector. It is a term that is covered in various disciplines such as transportation, economics, sociology or even in law; which has generated different definitions (Navarrete Rojas, 2014). For the first time it was proposed by the American physicist Jack Nilles in 1973 (Corbi, 2014) during the oil peak of the 1970s and defined it in 1976 as: "any form of substitution of displacements related to work activity by technologies of the information" or more explicitly "the possibility of sending the job to the worker, instead of sending the worker to the job" (Navarrete Rojas, 2014, p. 46). The purpose of this initiative was to reduce the consumption of fuel used for commuting to workplaces. On the other hand, the International Labor Organization defined telecommuting in 1990 as one that "is carried out in a distant place from the central office or the production center and it involves a new technology that allows separation and facilitates information" (Navarrete Rojas, 2014, p. 46).

Hence, telecommuting has been used for a long time worldwide, and it has been applied to public and private work spaces, due to the health crisis since 2020, and Ecuador has promoted telecommuting through the Ecuadorian Ministry of Labor, to guarantee the safety of workers who can take advantage of this approach.

Nonetheless, telecommuting can also be seen as either a sustainable transportation or sustainable mobility approach, considering that it refers to the provision of infrastructure, services, technologies, and information that allow access to goods and services, in the involvement of activities in such a way that they allow the continuous access and participation of future generations (Budnitz, 2019). Alongside, British professor Robin Hickman defines Sustainable mobility as "a means to access activities, within environmental limits and in an equitable manner" (Hickman & Banister, 2019, p. 29).

Sustainable mobility from the economic point of view must ensure the connection between workers and workplaces; the productive chain, and consumers. From the social point of view, it must guarantee to provide equitable, affordable access to good and services, employment, education, in order to promote a healthy life and cohesion among communities, and at the same time be able to reduce any personal risks (Budnitz, 2019).

Therefore, this study analyses telecommuting as a measure for sustainable transport in Ecuador, taking into consideration the social, economic, and environmental elements in the Ecuadorian context.

### 1.1 Related work

It is imperative to mention that telecommuting has been used extensively worldwide, and it has taken special attention and application in developing countries due to the global health crisis. For this reason, a variety of articles published recently have been analyzed to determine the benefits that can be associated with sustainable transportation.

The article developed by (O'Brien & Aliabadi, 2020), shows evidence on the fact that there are advantages associated with telecommuting, that can reduce commuting time, distance travelled, cost reductions, the reduction of traffic, and GHG emissions; likewise (Cerqueira et al., 2020), also indicates that telecommuting can contribute for managing travel demand, in order

to reduce traffic congestion, and GHG emissions; and Mouratidis, Peters & van Wee (2021) share the same advantages on telecommuting.

There is non-energy related benefits such as, the reduction of stress, healthier lifestyles, increasing morale and productivity, among others, according to O'Brien & Yazdani Aliabadi (2020), also it analyzes four domains: transportation and urban forms, offices, homes, and information and communication technology. O'Brien & Aliabadi (2020) and Cerqueira et al. (2020) indicate that there are rebound effects related to the increase of non-work related trips that might be influenced by travel patterns.

From the point of view of policy implementation and measures, Venturini, Karlsson & Münster (2019) analyze the effectiveness of transport policy measures from a holistic point of view, considering telecommuting part of the interventions to achieve sustainable mobility in the case study of Denmark, where telecommuting is considered to accommodate passenger travel demand as a soft measure that requires identification of potential user groups targeting behavioral travel changes to reduce commuting travel demand. Zhang & Zhang (2021) conclude that one of the main policy implications is the radical change of the population's lifestyle to promote the decarbonization of the transport sector by implementing policies that encourage telecommuting, along with energy improvements on the transport sector, urban planning and land use regulation, in order to obtain resilient, and sustainable cities in the post COVID world. Alongside, Godínez-Zamora et al. (2020) indicate that a variety of measures to attain a deep decarbonization that include energy efficiency, the adoption of electro mobility, the modal shift to public transportation, active mobility, and teleworking could allow a 25 % reduction of energy production by 2050 in the case of Costa Rica.

According to Giovanis (2018), the conclusion is that teleworking has a positive effect and the application results can vary according to the characteristics of every country i.e. social, political, economic, demographic, and cultural, and it is recommended as a measure for urban planning, and air urban quality improvement. It is stated "in this case teleworking can be a viable short- and long-term solution to emissions, fuel consumption and traffic congestion reduction, especially in the urban areas and an important tool for the quality of life improvement." (Giovanis, 2018, p. 12), There are other positive effects of teleworking that need to be analyzed such as, well-being, productivity and public health, employees, employers and the society overall, as the environment and public health, hospital admissions, productivity, and well-being.

Besides the positive effects mentioned, (Dima, Tuclea, Vranceanu & Tigu, 2019) state that telework could generate job opportunities for women with children and reduce unemployment in rural areas considering the sustainable social implications.

Teleworking in Ecuador has some benefits established by the Ministry of Labor, and consist of the following from the teleworker point of view: improvement of personal environment, productivity, responsibility, health, work time optimization. On the contrary, the benefits for the institutions include: reduction of space and costs on leasing, elimination of costs related to transportation and uniforms, achievement of management goals, more productivity and committed staff. Finally, the benefits for society are reduction of traffic, GHG emissions, reduction on travel times, more opportunities for vulnerable groups, and better family relationships (Morales López & Pérez Sisa, 2020).

## 2. Methodology

For the development of this research a descriptive approach was used to determine the energy savings, the amount of greenhouse gases avoided, and the monetary savings that can be obtained through the implementation of telecommuting. The information used for the investigation was based on the Ecuadorian National Energy Balance 2019, where the annual gasoline consumption in gallons is considered. Also, information from the National Institute of Statistics and Censuses is reflected to display the total population, the total automotive fleet, and the National Survey of Income and Expenditure helped determine the average income, as well as, the average spending from the highest deciles of the population; the Ministry of Labor supplied information regarding the amount of employees nationwide. The data from the different institutions aided to develop well-posed hypotheses. On the other hand to determine the carbon footprint a methodology established by the Environmental Protection Agency EPA is taken as a reference (EPA, 2021).

### 2.1 Sustainable Development

Sustainable development can be achieved with the use of the approaches previously mentioned. It was stated for the first time in the Bruntland report (Report entitled "Our Common Future" 1987, World Commission on Environment and Development) in 1987, and defined as "the development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (United Nations-General Assembly, 1987, p. 54). This report was the base for different organizations worldwide to develop plans e.g. World Wildlife Fund WWF, Greenpeace, and others, and the United Nations have been able to establish the parameters to achieve environmental sustainability through the development of the Sustainable Development Goals SDGs (United Nations, n.d.).

Simultaneously, in 2020 YALE University has developed the Environmental Performance Index EPI, which provides a summary based on sustainability around the world. It uses 32 performance indicators within 11 categories, and ranks 180 countries on environmental health and ecosystem vitality. These indicators provide a national-level indicator of how close countries are to established environmental policy goals and provide practical guidance for countries aspiring to move towards a sustainable future (Yale, 2020).

According to the Environmental Performance Index EPI, and the indicators provided, Ecuador is ranked 56 overall out of 180 countries in the world. In Latin America and the Caribbean, considering 32 countries, Ecuador is in seventh place. Joining efforts on this subject, the *América Economía* platform has developed for the first time a Latin American sustainability ranking, where greenhouse gas emissions, energy matrix, biodiversity management, agricultural pollution, air quality in urban areas and environmental taxes are analyzed (León De La Barba, 2020). Ecuador is in 6th place among 11 countries selected for this first Latin American ranking edition and it is shown in Table 1.

Nevertheless, neither the Sustainable Development Goals, nor The Environmental Performance Index EPI, nor the Latin American Sustainability Ranking explicitly describe sustainable transportation as a dimension to achieve sustainable development. Considering the elements previously mentioned and the different approaches to attain sustainable transport, it is imperative that they have to be evaluated as a specific dimension in the sustainable development parameters.

**Table 1.** Latin American Sustainability Ranking

RK	Country	Dimension							Final index
		GHG Emissions	Energy Matrix	Biodiversity and forests	Agricultural pollution	Water resources	Air Quality	Environment taxes	
1	Costa Rica	100	100	69.7	63.4	82.6	52.1	100	85.01
2	Uruguay	38.8	95.1	45.7	43.6	100	100	76.9	71.73
3	Brasil	64.5	83.9	93	51.1	92	73.7	28.9	66.88
4	Colombia	71.5	89.1	61.1	64.7	92	50.6	40.9	65.85
5	Chile	81.2	64.4	100	61.4	62.5	37.7	54.7	64.00
6	Ecuador	60.5	67	60.3	63.3	67.4	56.1	68.4	62.65
7	México	69.2	50.8	67.8	100	44.6	41.6	71.6	60.91
8	Argentina	56.1	49.5	25.4	39.5	76.9	74.4	54.2	57.28
9	Paraguay	32.6	75.1	28	34.8	99.2	74.4	55.6	56.61
10	Perú	79.4	73.2	46.2	64.4	75.1	30	20.9	55.92
11	Bolivia	19.1	22.7	80.2	63	78	37.3	65.3	41.72

## 2.2 Sustainable Mobility and the ASI Approach

Through time different approaches have been developed to deal with topics related to sustainable mobility. One of them is the ASI approach (Avoid, Shift, Improve). Within which, telecommuting has been considered as a measure to be applied, and obtain benefits as society. The origin of this approach dates back to the early 1990s in Germany, and it was later accepted and applied for the first time in 1994 in the report Enquete emitted by the German parliament. The approach serves as a tool to structure policy measure to reduce the environmental impacts of transport, and thus improve inhabitant's quality of life. In community development, the ASI approach was first adopted by international NGOs, as well as multilateral, bilateral, and development organizations working on transportation-related problems. It was seen as a valuable alternative to manage the "predict-provide" approach. The ASI approach focuses on the demand side and offers a more holistic intervention to design a complete sustainable transport system (Bongardt, et al., 2019).

The ASI approach encompasses three main pillars, that include mobility management and energy efficiency in the transport sector (Kreuzer & Wilmsmeier, 2014):

1. Avoid.- Avoid or reduce travel or the need to travel by motorized means - Improve the efficiency of the system.
2. Shift.- Shift current mobility towards more efficient modes of transport - Increase travel efficiency.
3. Improve.- Improve fuel efficiency in transportation modes - Increase vehicle efficiency.

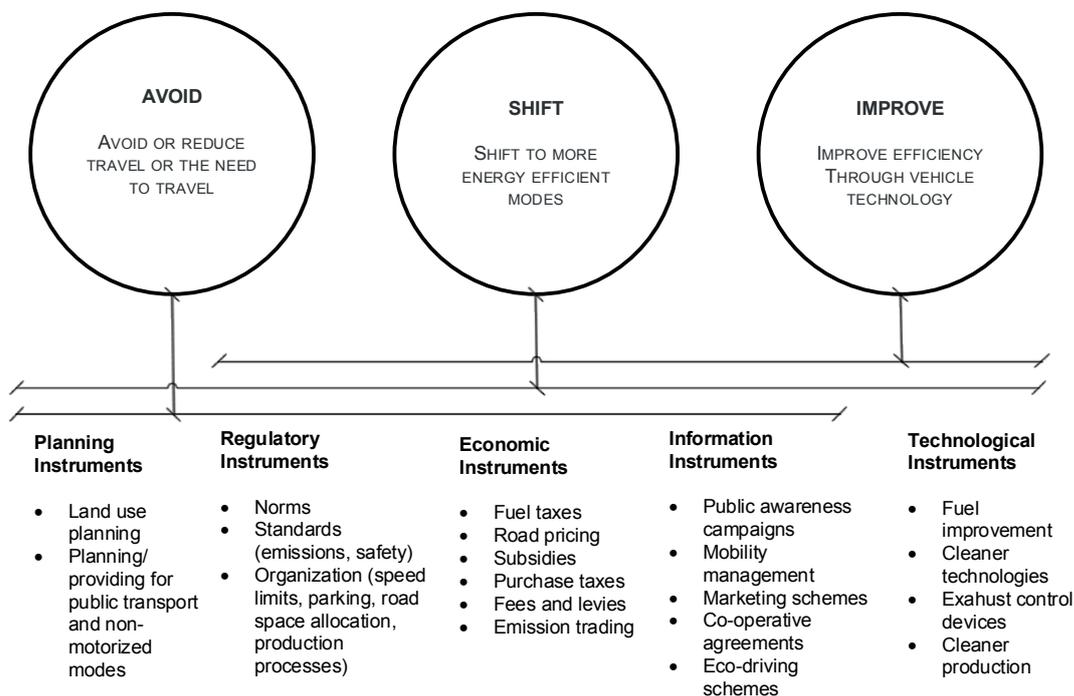
These pillars can be seen in Figure 1, which shows the tools that can be implemented to obtain the best results in a process of applying them (Transformative Urban Mobility Initiative TUMI, 2019). Taking the aforementioned, teleworking is within the AVOID pillar, and it proposes avoiding or reducing travel or the need to travel (without travel activity). It is important to men-

tion that there are a variety of instruments that are transversal and can be applied simultaneously. The existing instruments are:

- Planning instruments
- Regulatory instruments
- Economic instruments
- Information instruments
- Technological instruments

For this reason, within the different instruments telecommuting can be classified as an information or communication instrument, which can be articulated through a normative and regulatory instrument for its application, and it can be taken as a sustainable transport measure, which is part of a larger equation of different components that must be articulated through all the institutions that have jurisdiction over traffic, transportation, road safety, and land use planning, among others. The analysis of telecommuting that must be carried out must have a direct link with the reduction of unnecessary trips, which are directly proportional to the reduction of fossil fuels, and the reduction of greenhouse gases GHG. The reduction of fossil fuels and GHG can be quantified in order to obtain results to exemplify that inhabitant's quality of life can be substantially improved.

**Figure 1.** Approach ASI – Instruments



### 2.3 Transport Demand Management TDM

Telecommuting is also considered part of the Transport Demand Management TDM for its acronym. Transport Demand Management (TDM) aims to maximize the efficiency of the urban transport system through a wide range of techniques and strategies, e.g. congestion pricing,

improving public transport, promoting non-motorized transport, fuel control, parking management, car sharing, as well as telecommuting (Broaddus, Litman & Menon, 2009), among others, which can be seen in Figure 2 (Mobility Lab, n.d.).

As it was mentioned in the ASI approach, telecommuting is part of holistic measures in the Transport Demand Management TDM, and it must be articulated in a general way through the competent entities to obtain the desired results.

**Figure 2.** Transport Demand Management Options



## 2.4 Ecuador's Current Situation

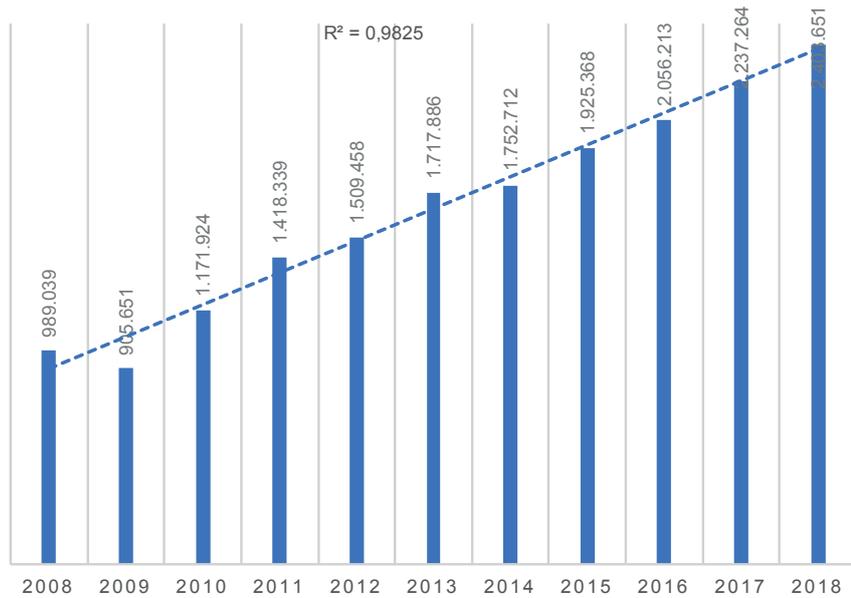
Despite the fact that telecommuting has been talked about for a long time, in Ecuador started in 2020 due to the worldwide health crisis, as safety measure to avoid any risks related to COVID-19, which has resulted in a decrease in energy consumption and GHG emissions. However, from the transportation point of view traffic congestion and the growth of the automobile fleet must be analyzed, since they are related to problems that challenge urban and suburban areas; combined with disorderly urban sprawl and the exponential population growth. In Ecuador, around 77,80 % of the total population resides in urban areas and it is expected that by 2030 it will reach 80,60 % (Lattes, 2001). By 2018, according to the Ecuadorian Institute of Statistics and Censuses (INEC), the population of Ecuador was 17.08 million people (INEC, 2019); in the same year, the total registered vehicle fleet was 2 403 651 units, which includes all type of vehicles (INEC, 2020). This information is useful to determine Ecuador's motorization rate, as it is shown in equation 1.

$$\text{Motorization Rate} = \frac{\# \text{ Vehicles}}{\text{Population}} \times 1000 \quad (1)$$

The motorization rate in Ecuador in 2019 was 141 vehicles per 1 000 inhabitants. Latin America and the Caribbean had an average of 201 vehicles per 1 000 inhabitants, being one of the highest worldwide together with Asia and the Middle East (Rivas, Suárez-Alem-an & Serebrisky,

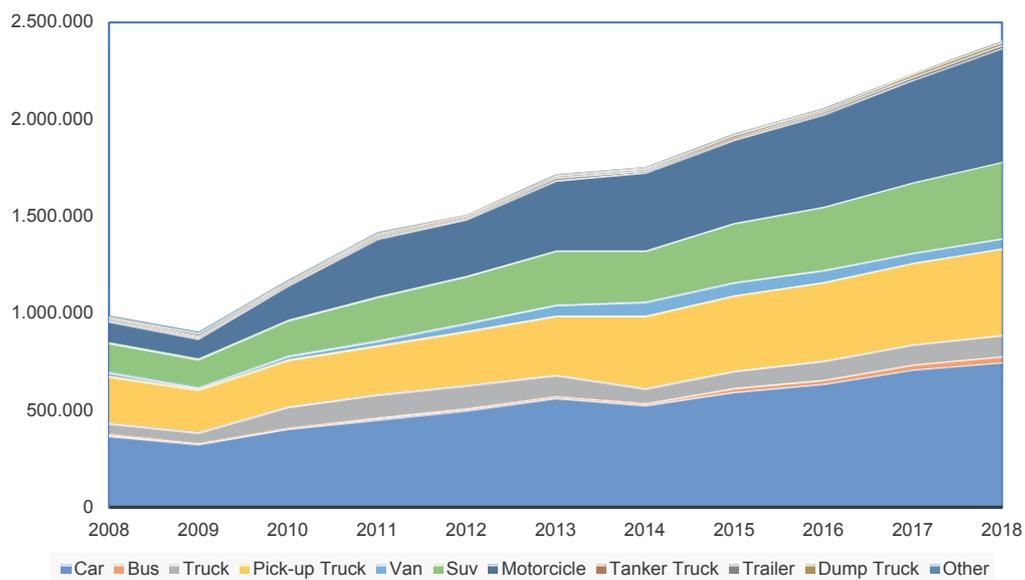
2019). Moreover, revising the statically information about the Ecuadorian fleet it can be seen that it has increased linearly at an average of 10 % per year, as it is shown in Figure 3 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2021). It is expected that the fleet will continue to increase, whereas the road capacity is in a continuous process of saturation, due to the lack of land use planning and articulated projects to benefit pedestrians and bicycle users at the local level.

**Figure 3.** Automotive Fleet Growth in Ecuador per year



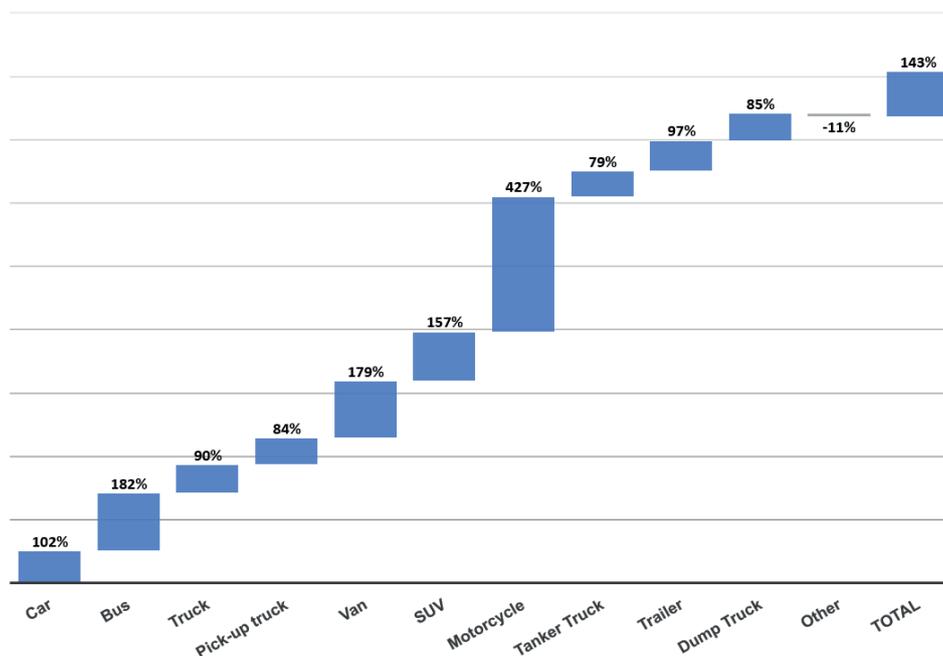
More graphically the growth of the different types of vehicles in Ecuador annually can be seen in Figure 4.

**Figure 4.** Automotive Fleet by type of vehicle per year



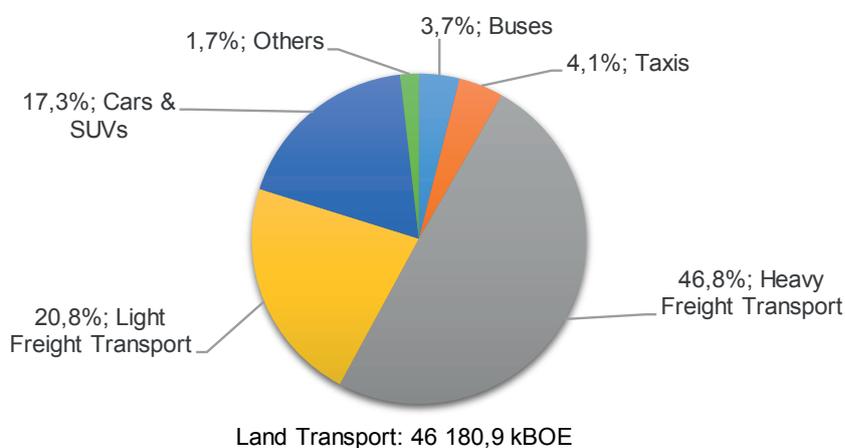
The growth rate was analyzed in a 10-year period (2008-2018), where it can clearly be seen that the most representative growth is in motorcycles, buses, vans, SUVs, and cars see Figure 5.

**Figure 5.** Ten-year % growth by type of vehicle



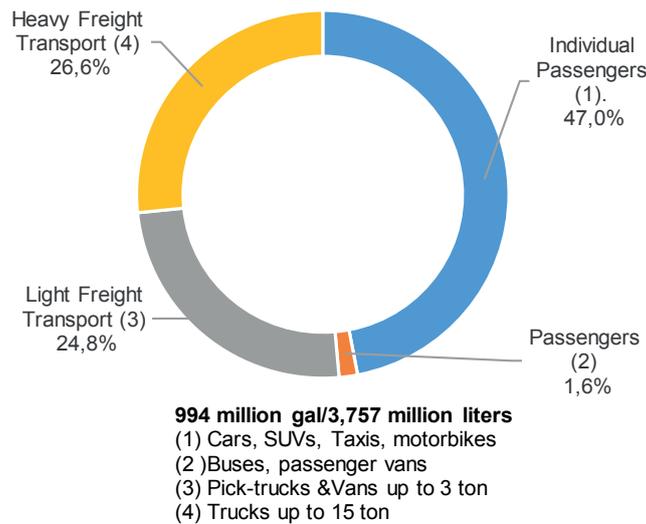
According to the National Energy Balance 2019 (2018 base), the energy consumption from the transport sector was equivalent to 46 181 kBOE (kilo barrels of oil equivalent), corresponding to 94.4 % from the total demand. Considering only the demand from cars, SUVs, and buses the energy demand was 21 % equivalent to 9 698 kBOE Figure 6 (Instituto de Investigación Geológica y Energética-IIGE, 2019).

**Figure 6.** Energy Consumption Road Sector %



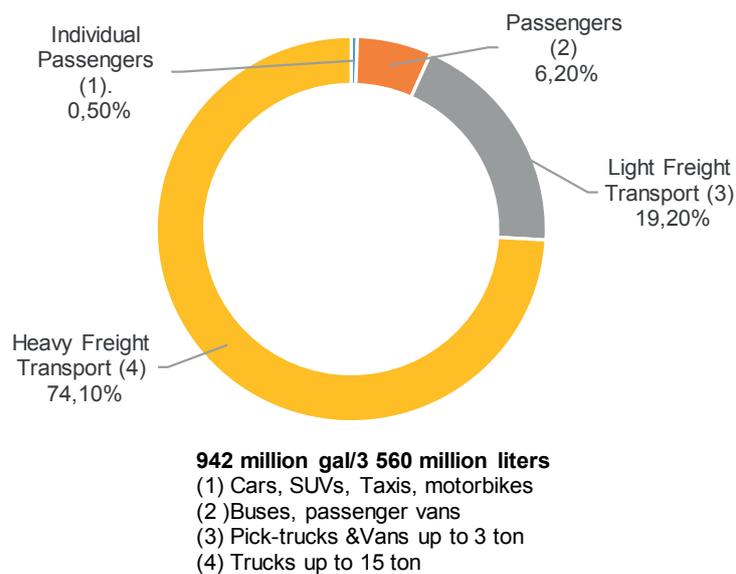
An analysis can be done to determine the amount of fuel by type of vehicle. Considering the amount of gasoline, for individual passenger cars and collective passenger vehicles it sums up to 48.6 % of 994 million gallons of gasoline (3 757 million liters of gasoline), which is equal to 483 million gallons of gasoline (1 826 million liters), as it is shown in Figure 7. (Insituto de Investigación Geológico y Energético-IIGE, 2019)

**Figure 7.** Gasoline Consumption by type of transport %



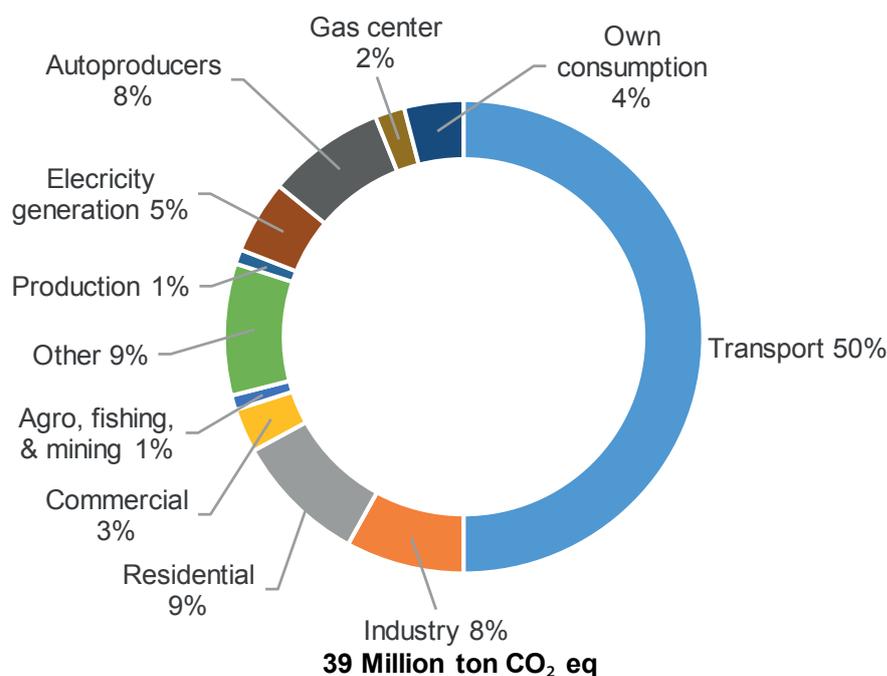
On the other hand, diesel consumption is similar to the consumption of gasoline it equals to 942 million gallons (3 560 million liters), from which only 6.7 % corresponds to passenger individual vehicles (0.50 %) and collective vehicles (6.2 %) totaling 63.11 million gallons (238 million liters) Figure 8. (Insituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, 2019).

**Figure 8.** Diesel Consumption per type of transport %



Regarding greenhouse gas emissions GHG, it can be clearly seen that the transport sector is the biggest contributor. In 2019 39 million tons of CO<sub>2</sub>-eq were emitted to the atmosphere; 50 % corresponds to the transport sector which is equivalent to 18 million tons of CO<sub>2</sub>-eq. Figure 9. (Insitituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, 2019).

**Figure 9.** Greenhouse gases by sector

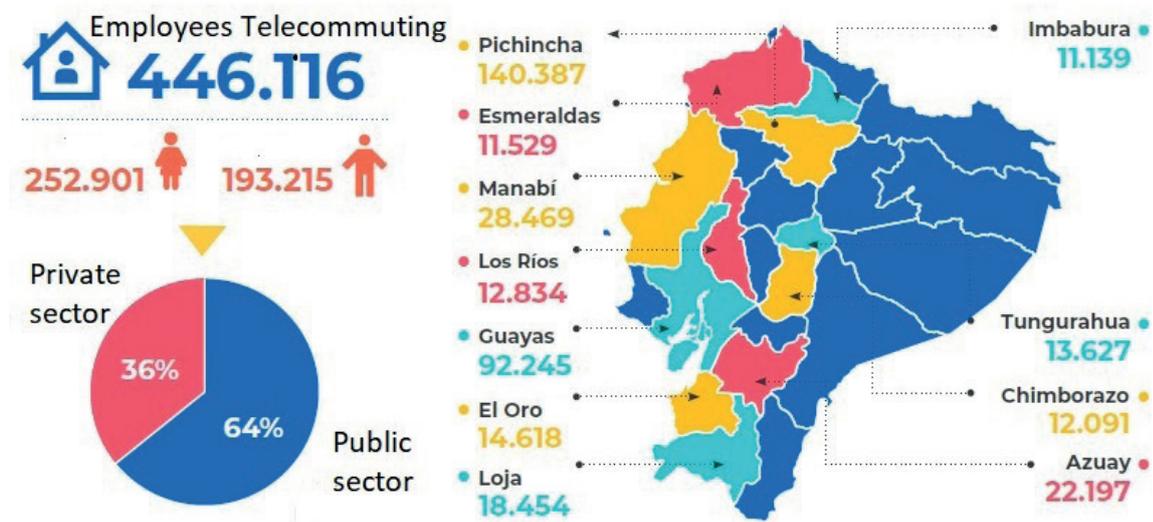


## 2.5 Telecommuting in Ecuador

Telecommuting should not only be used as a measure to prevent COVID-19 infections. It can be analyzed, to maintain it permanently, to improve working conditions and schedules, through a constant improvement in technological services, that employees can carry out their tasks in other places including their home (Giovanis, 2018), and at the same time reduce energy consumption, GHG emissions, and traffic congestion.

In Ecuador, the Ministry of Labor registered 2 289 447 current employment contracts until December 2020 including private and public employees; there were 446 116 employees telecommuting equivalent to 19.49 % of the total of employees at the national level. The percentage of public employees who were telecommuting was 64 %, whereas the percentage of private employees was 36 %. The province with the largest number of employees on telecommuting was the province of Pichincha with 140 387 people (Ministerio del Trabajo del Ecuador, 2020) Figure 10. This information, would be useful to analyze the energy consumption savings, as well as, GHG emissions, which result in monetary savings for the national government and Ecuadorian families.

Figure 10. Total number of employees Telecommuting



The positive effects of teleworking, such as the reduction in the number of trips and kilometers traveled have been supported by policy makers and has been demonstrated by some academics through research (Cerqueira et al., 2020). Some studies have shown that, on weekdays, non-work related trips are limited in relation to the number of trips and distance, which are short and related to grocery shopping, for example. Although, there are other variables from the socio-economic point of view, such as the presence of infants in households, these will not be considered as they contribute to an increase in the average of non-work related trips, and the objective of this analysis it is precisely related to the displacements of public and private employees to their workplaces.

Taking this information into consideration, alike Greenpeace Spain, a question arises how much CO<sub>2</sub> can teleworking save by avoiding work trips? (Büttner & Breitzkreuz, 2021).

Interestingly, the question is answered by the International Energy Agency IEA from the global context "Working a day from home could save 1 % per year of the global consumption of oil used in transporting people by road. This would mean a reduction of 24 million tons of CO<sub>2</sub> equivalent from total global CO<sub>2</sub> emissions, assuming that 20 % of the world's work could be done from home" (IEA, n.d.)

### 3. Results

In order to carry out a detailed analysis of energy savings and determine the decrease in emissions in the transport sector, it is imperative to conduct surveys to employees who are telecommuting, in order to determine the vehicle kilometers travelled VKT and the mode of transport used to get to their workplaces. However, this detailed information in Ecuador is not available; therefore, assumptions can be made from the point of view of the number of vehicles that have stopped circulating strictly for work related mobilization. In Ecuador, according to the data provided by the National Institute of Statistics and Censuses INEC, it can be determined that only 14 % of the population owns a vehicle. Also, according to the National Survey of Income and Expenditure of urban and rural households, developed by the National Institute of Statistics and Censuses INEC in 2012, it can be assumed that the employees that are telecommuting co-

respond to the two highest deciles; considering that a higher income is correlated to the level of education; all of the employees are located in urban areas; the average income of the highest two deciles is \$1 875 USD; the percentage of the two highest deciles corresponds to 42 % among all deciles; the total average spending is \$1 508.50 USD; the average percentage of household consumption expenses in transport related activities is 18.76 % from the total (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2012). Consequently, taking the data previously mentioned, it can be assumed that inhabitants that are part of the two highest deciles can afford owning a private vehicle because their income and expenses can justify the ownership. Thus, the percentage of all the employees that are telecommuting and own a private vehicle can be taken as 42 % of 444 116, corresponding to 187 369 vehicles. Likewise, it is presumed that all these vehicles are powered by gasoline internal combustion engines, considering that only 0.5 % of individual vehicles are powered by diesel engines.

Taking as a reference the combined fuel economy of cars and light trucks, the weighted average was determined to be 36 km per gallon (9.52 km/l) (EPA, 2021), and the average number of kilometers travelled annually VKT is estimated at 20 000 km in Ecuador, but it is assumed that these vehicles will only circulate 10 000 km annually corresponding to work related displacements. Thus, it is possible to determine the amount of fuel consumption (in gallons and liters of gasoline) that can be saved per vehicle annually with equation 2.

$$Vol = \left( \frac{VKT}{\bar{X}} \right) \quad (2)$$

Where:

Vol = Volume number of gallons (liter) of gasoline per vehicle

VKT = Vehicle kilometer travelled annually 10 000 km

$\bar{X}$  = fuel economy of cars and light trucks 36 km/gal  $\approx$  9.52 km/l

Obtaining the following results:

**Vol  $\approx$  278 gal/yr per vehicle  $\approx$  1 050 l/yr per vehicle**

In the same way, to be able to determine the annual fuel amount from all vehicles, equation 3 is used.

$$V_{total} = \# Vehicles * Vol \quad (3)$$

Where:

Vtotal = the total amount of fuel (gasoline) saved in a year

#Vehicles = the total number of cars that reduced their VKT due to telecommuting =187 369

Vol  $\approx$  278 gal/year per vehicle  $\approx$  1 050 l/year per vehicle obtained from (2)

Obtaining the following results:

**Vtotal  $\approx$  52 088 582 gal/yr  $\approx$  196 894 840 l/yr**

The corresponding energy factor for gasoline needs to be evaluated, which according to the Environmental Protection Agency EPA is equal to 8.887 grams of CO<sub>2</sub> per gallon of gasoline consumed (this value assumes that all the carbon in the gasoline is converted to CO<sub>2</sub>), which corresponds to 8.887 $\times$ 10<sup>-2</sup> metric tons of CO<sub>2</sub>/gal of gasoline (2.347 $\times$  10<sup>-3</sup> metric tons of CO<sub>2</sub>/liters of gasoline) (EPA, 2021).

Similarly, the Environmental Protection Agency noted that the proportion of emissions of CO<sub>2</sub> and other pollutants (including carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, all expressed as CO<sub>2</sub> equivalents) for passenger vehicles is 0.993. These values will be useful to determine the carbon footprint for this specific case, so to determine the amount of CO<sub>2</sub>-equivalent per passenger vehicle per year, the methodology established by the EPA is taken as a reference (EPA, 2021) with equation 4.

$$CO_{2-eq} = \frac{Ef \cdot VKT}{\bar{X} \cdot Pf} \quad (4)$$

Where:

Ef = Emission factor for gasoline = 8.887×10<sup>-3</sup> metric tons of CO<sub>2</sub>/gal of gasoline (2.347× 10<sup>-3</sup> metric tons of CO<sub>2</sub>/liters of gasoline)

VKT = Vehicle kilometer travelled annually 10 000 km

$\bar{X}$  = fuel economy of cars and light trucks 36 km/gal-9.52 km/l

Pf = Proportionality factor for other pollutants 0.993

Obtaining the following results:

**CO<sub>2</sub>-equivalent ≈ 2.49 metric tons/vehicle/yr**

This value multiplied by the number of vehicles will determine the total amount of metric tons saved annually, as it can be seen in table 2.

**Table 2.** Carbon Footprint from all Vehicles

Calculation CO <sub>2</sub> -equivalent/yr		
Number of vehicles	Tons CO <sub>2</sub> -eq/vehicle/yr	Tons CO <sub>2</sub> -eq/yr
187 369	2,49	466 549

In contrast, considering that 58 % of the employees that are telecommuting do not own a private vehicle, it would mean that 258 747 people must use other means of transport. For this analysis, the following assumptions will be considered: 258 747 employees take the bus to get to their workplace; the average round trip distance to the workplace is estimated at 18 km; the number of working days per year is considered to be 200 days excluding holidays and the vacation period for each employee; the emission factor per person using a diesel bus per kilometer travelled is assumed to be equal to 0.19 kg CO<sub>2</sub>-eq (Cambio Climático Murcia, n.d.). The calculation to determine the carbon footprint can be seen in table 3.

**Table 3.** Carbon footprint employees that take the bus to work

Number of Employees	Distance travelled km/day	Working days - annually	Avoided Distance travelled by all employees km/yr	EF - urban bus (kg CO <sub>2</sub> -eq)	kg Co2-eq/yr	ton Co2-eq/yr
258 747	18	200	931 489 200	0.19	176 982 948	176 982.95

The avoided emissions are equal to 176 982.95 metric tons of CO<sub>2</sub>-eq/year. Considering all the values calculated, a fuel consumption, as well a monetary saving analysis comparison can be done to determine the benefits of telecommuting as it can be seen in Table 4. Currently, the cost of a gallon of regular gasoline and gasoline with ethanol in Ecuador is \$2.18 USD (\$0.58/liter) (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021), whereas the average price internationally is \$4.61/gal (\$1.22/liter) (Prices, 2021). In Table 4 a summary of gasoline fuel consumption, fuel savings and monetary savings can be seen by the implementation of telecommuting, taking into account the local price of fuel as well as the international price.

**Table 4.** Fuel consumption and monetary savings

Individual Passenger Vehicles Savings		
	Gallons	Liters Savings
	\$	\$/yr
Fuel consumption of gasoline 2019	467 180 000 gal	1 765 940 400 l
Fuel consumption savings per year	52 088 582 gal	196 737 450 l
\$ liter international price	\$ 1.22	\$240 211 704.75
\$ gal international price	\$ 4.61	\$240 211 704.75
\$ liter subsidized price in Ecuador	\$ 0.58	\$113 044 035.16
\$ gal subsidized price in Ecuador	\$ 2.18	\$113 044 035.16
Total \$ savings for consumers/yr	\$ 2.18	\$113 044 035.16
Total \$ savings government/yr	\$ 2.43	\$126 090 768.76
%Fuel reduction consumption/yr	11.15 %	

It can be observed that the fuel consumption decrease by the application of telecommuting in private vehicles is 11.15 % from the total fuel consumption in 2019; it is proven that the energy savings are noteworthy along with the monetary savings for the inhabitants and the government, bearing in mind the cost for the government to import petroleum derivatives to produce gasoline, and the cost of the subsidy.

From an environmental point of view, it must be considered that there is a direct link with the monetary savings that can be obtained. Therefore, the price of the ton of CO<sub>2</sub> in the international market has to be analyzed. The European CO<sub>2</sub> Trading System SENDECO<sub>2</sub>, a member of IETA (International Emissions Trading Association), indicates that the average annual price of a ton of CO<sub>2</sub> is € 44.36/\$ 52.35 USD, reaching its highest price in July of this year € 55.27/\$ 65.22 USD (SENDECO<sub>2</sub>, 2021).

The data presented is taken to carry out an analysis of the potential economic savings, which results from avoiding GHG being emitted into the atmosphere Table 5, taking into consideration the two measures developed for employees who are telecommuting.

**Table 5.** Potential economic savings-avoided GHG

Measure	ton CO <sub>2</sub> -eq saved/yr	Total ton Co2-eq saved/yr	Cost ton CO <sub>2</sub> - international market	Total savings \$/yr
Vehicles reduction VKT by telecommuting	466 549	643 532	\$ 52.35	\$33 688 887.53
Employees reduction in distance travelled by bus	176 983			

The total monetary savings by implementing telecommuting in Ecuador can be summarized in Table 6, combining the fuel reduction and the emissions avoided. It is important to contemplate that for the fuel consumption savings the international price of gasoline is taken into consideration.

**Table 6.** Total monetary savings

Dimension	\$/year	Total savings/yr
Fuel savings	\$240 211 704.75	\$273 900 592.28
Emission savings	\$33 688 887.53	

The total savings, establish that telecommuting in fact can be used as a measure to improve inhabitant's quality of life, and policies need to be developed at the national level to support this measure. Also, the savings can be used to develop national, and local plans to improve the mobility plans in cities across the country.

#### 4. Discussion

It is important to consider the four dimensions established by O'Brien & Yazdani Aliabadi (2020): transportation and urban forms, offices, homes, and information and communication technology in the local context to further develop research, that needs to be applied not only on the energy and environmental sector, but also in the behavior patterns and preferences of people to determine where to live, and what transport mode to use. Furthermore, it is mentioned that there are some disadvantages, from which only a few apply to the case of Ecuador, for instance, the increase of energy use, the reliance on ICT for work related communications, increase employee perception of isolation, increased data security risks, and reduced psychological benefits of commuters; disadvantages of telecommuting are a topic for supplementary investigation. O'Brien & Yazdani Aliabadi (2020) and Cerqueira et al. (2020), state the rebound effects of teleworking related to increase non-work related trips, which needs to be studied through the development of surveys to determine energy usage, and GHG emissions.

It is equally important the development of holistic policies along with telecommuting, to guarantee all inhabitants will have equal access to the transportation system, regardless of the preferred mode of transportation (Venturini et al., 2019). To attain the decarbonization of the transport sector (Zhang & Zhang, 2021), urban planning is relevant for the development of policies that will improve inhabitant's quality of life, as well as a variety of measures to reduce the energy production (Godínez-Zamora et al., 2020); in the case of the application of teleworking in Ecuador the yearly energy savings can sum up to 11.15 %. Giovanis (2018) states that

teleworking in fact can be a recommended measure in the short and long run, and there are other effects that need additional studies related to health, and well-being, society, productivity, among others. Dima et al. (2019) mentioned that telecommuting has positive sustainable social implications that need to be considered locally. As stated by Morales López & Pérez Sisa (2020) all the benefits associated have to measure at different levels of employees, organizations, and society to corroborate what was established by the Ministry of Labor

This research has served as a reference to determine that there could be savings associated to energy consumption and GHG emissions, which is justified by the research carried out worldwide. Nonetheless, more research needs to be developed in the areas of social, psychology, gender, as well as traffic and its direct link with car accident reduction. Also, the deployment of surveys and open data is essential to be able to determine the benefits, the possible disadvantages, and the rebound effects in the Ecuadorian context.

## 5. Conclusion

In summary, after reviewing the parameters to attain sustainable development, it is essential that sustainable transportation dimensions are included unambiguously to improve inhabitant's quality of life using general methodology. The different approaches for sustainable transport were analyzed, along with the hypothesis presented, which helped to determine the potential energy, environmental, and monetary savings. Consequently, it can be concluded that with the sample presented, teleworking has the feasibility of reducing not only CO<sub>2</sub> emissions, but also other pollutants such as nitrous oxides NO<sub>x</sub>, nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>, particulate matter PM<sub>2-5</sub> and PM<sub>10</sub>, ozone O<sub>3</sub>, benzene, sulfur oxides SO<sub>x</sub>, among others; which are mainly from the transport sector (Büttner & Breitzkreuz, 2021). In addition, the energy consumption from the transport sector was decreased by 11.15 %; this reduction of energy consumption from fossil fuels can be transferred to residential energy consumption, which has increased slightly, and there wouldn't be related emissions, since that the largest amount of electricity generation in the country is based on hydroelectric power plants. Additionally, the monetary savings obtained in this research demonstrate that by implementing telecommuting as a measure of sustainable transport, the condition of inhabitants can be improved, attaining the social, economic, and environmental parameters established in sustainable development. The savings determined could be seen as insignificant compared to the Ecuadorian General State Budget. However, it is worth mentioning that telecommuting is only one element that should be integrated with the rest of measures that are part of sustainable transport, and the benefits would be unprecedented, if they are applied holistically at local governments with the help of the central government. For this reason, teleworking should be considered as a viable sustainability transport tool.

## References

- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2021). *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables - ARC*. Precios combustibles. <https://controlrecursosyenergia.gob.ec/precios-combustibles/>
- Bongardt, D., et al. (2019). *Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (A-S-I)*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. [https://www.transformative-mobility.org/assets/publications/ASI\\_TUMI\\_SUTP\\_iNUA\\_No-9\\_April-2019.pdf](https://www.transformative-mobility.org/assets/publications/ASI_TUMI_SUTP_iNUA_No-9_April-2019.pdf)

- Broaddus, A., Litman, T. A., & Menon, G. (2009). Transportation Demand Management: Training Document. In *Transportation in the New Millennium*, 0 (0): 1-118. <http://gulliver.trb.org/publications/millennium/00123.pdf>
- Budnitz, H. (2019). Sustainable Mobility. In Leal Filho, editors, *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education* (pp. 1833-1842). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_67)
- Büttner, L., & Breitzkreuz, A. (2021). *Un año de teletrabajo. Su impacto en la movilidad y en las emisiones de CO2*. <https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2021/03/informe-teletrabajo-GP-2.pdf>
- Cambio Climático Murcia. (n.d.). *Cambio Climático Murcia*. E-CO2 Calculadora. Retrieved July 7, 2021, from <http://cambioclimaticomurcia.carm.es/calculadora/index.htm#>
- Cerqueira, E. D. V., et al. (2020). Does working from home reduce CO2 emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83: 102338. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102338>
- Corbi, M. (2014). *Blog Lenovo*. Teletrabajo: pasado, presente y futuro. <https://www.bloglenovo.es/teletrabajo-pasado-presente-y-futuro/>
- Dima, A. M., et al. (2019). Sustainable social and individual implications of telework: A new insight into the Romanian labor market. *Sustainability*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/su11133506>
- EPA. (2021). *Environmental Protection Agency*. Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero. Cálculos y referencias. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>
- Giovanis, E. (2018). The relationship between teleworking, traffic and air pollution. *Atmospheric Pollution Research*, 9(1): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.004>
- Godínez-Zamora, G., et al. (2020). Decarbonising the transport and energy sectors: Technical feasibility and socioeconomic impacts in Costa Rica. *Energy Strategy Reviews*, 32:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100573>
- Hickman, R., & Banister, D. (2019). Transport and the environment. In *A Research Agenda for Transport Policy*. Edward Elgar Publishing. p. 25-33. <https://doi.org/10.4337/9781788970204.0001>
- IEA. (n.d.). *International Energy Agency*. Working from Home Can Save Energy and Reduce Emissions. But How Much? Retrieved July 6, 2021, from <https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much>
- INEC. (2019). Ecuador cuenta con su reloj poblacional. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-cuenta-con-su-reloj-poblacional/>
- INEC. (2020). Anuario de estadísticas de transporte 2019. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica\\_de\\_Transporte/2019/2019\\_ANET\\_PPT.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica_de_Transporte/2019/2019_ANET_PPT.pdf)
- INEC. (2021). Anuario de estadística de transporte. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/anuarios-de-transporte-2/>
- INEC. (2012). Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares urbanos y rurales 2011-2012. Resumen metodológico y principales resultados. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Sociales/Encuesta\\_Nac\\_Ingresos\\_Gastos\\_Hogares\\_Urb\\_Rur\\_ENIGHU/ENIGHU-2011-2012/Metologia\\_ENIGHUR\\_2011-2012\\_rev.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/Encuesta_Nac_Ingresos_Gastos_Hogares_Urb_Rur_ENIGHU/ENIGHU-2011-2012/Metologia_ENIGHUR_2011-2012_rev.pdf)
- Instituto de Investigación Geológica y Energética - IIGE. (2019). *Balance energético nacional 2019*. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/12/Balance-Energetico-Nacional-2019-1.pdf>
- Kreuzer, F. M., & Wilmsmeier, G. (2014). *Eficiencia energética y movilidad en América Latina y el Caribe, Una hoja de ruta para la sostenibilidad*.
- Lattes, A. E. (2001). Población urbana y urbanización en América Latina. In Fernando Carrión, editor, *La ciudad construida urbanismo en América Latina*. FLACSO. p. 49-77.

- León De La Barba, A. M. (2020). *América Economía*. Primer Ranking Latinoamericano de Sustentabilidad una medición necesaria. <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/primer-ranking-latinoamericano-de-sustentabilidad>
- Ministerio del Trabajo del Ecuador. (2020). *Boletín Estadístico anual - El mercado laboral del Ecuador 2020*. [https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2021/04/BoletinAnual\\_V7.pdf](https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2021/04/BoletinAnual_V7.pdf)
- Mobility Lab. (n.d.). *Mobility Lab*. Retrieved June 30, 2021, from <https://mobilitylab.org/about-us/what-is-tdm/>
- Morales López, D. A., & Pérez Sisa, F. G. (2020). Teletrabajo como estrategia de competitividad y desarrollo para las empresas en el Ecuador. *Revista Eruditus*, 1(2): 53-70. <https://doi.org/10.35290/re.v1n2.2020.318>
- Mouratidis, K., Peters, S., & Van Wee, B. (2021). Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92: 102716. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102716>
- Navarrete Rojas, J. (2014). El teletrabajo, ventajas e inconvenientes. *Icade. Revista de La Facultad de Derecho*, 93: 27. <https://revistas.comillas.edu/index.php/revistaicade/article/download/4711/4526/>
- O'Brien, W., & Yazdani Aliabadi, F. (2020). Does telecommuting save energy? A critical review of quantitative studies and their research methods. *Energy and Buildings*, 225: 110298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110298>
- Prices, G. P. (2021). *Global Petrol Prices*. Gasoline Prices, Liter, 12-Jul-2021. [https://www.globalpetrolprices.com/gasoline\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/)
- Rivas, M. E., Suárez-Alemán, A., & Serebrisky, T. (2019). Hechos estilizados de transporte urbano en América Latina y el Caribe. In *Nota Técnica No. IDB-TN-1640*. [https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hechos\\_estilizados\\_de\\_transporte\\_urbano\\_en\\_América\\_Latina\\_y\\_el\\_Caribe\\_es\\_es.pdf](https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hechos_estilizados_de_transporte_urbano_en_América_Latina_y_el_Caribe_es_es.pdf)
- SENDECO<sub>2</sub>. (2021). *SENDECO<sub>2</sub>*. Precios CO<sub>2</sub>. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Transformative Urban Mobility Initiative TUMI. (2019). *Avoid Shift Improve - Instruments*. <https://www.transformative-mobility.org/publications/avoid-shift-improve-instruments>
- United Nations. (n.d.). *Sustainable Development Goals*. Sustainable Development Goals. Retrieved April 13, 2021, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/>
- United Nations-General Assembly. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: "Our common future" Our common future [Brundtland report]*. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?ln=es#record-files-collapse-header>
- Venturini, G., Karlsson, K., & Münster, M. (2019). Impact and effectiveness of transport policy measures for a renewable-based energy system. *Energy Policy*, 133: 110900. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110900>
- Yale. (2020). *Environmental Performance Index*. 2020 EPI Results. <https://epi.yale.edu/epi-results/2020/component/epi>
- Zhang, R., & Zhang, J. (2021). Long-term pathways to deep decarbonization of the transport sector in the post-COVID world. *Transport Policy*, 110: 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.05.018>

# Influencia del estado de conducción, tipo de vehículo y condiciones de viaje en las variables cinemáticas de las rutas en autobuses urbanos. Caso de estudio Ibarra-Ecuador

## *(Influence of the Driving Cycle, Type of Vehicle and Travel Conditions in the Cinematic Variables of the Routes in Urban Buses. Case Study Ibarra-Ecuador)*

Fredy Rosero<sup>1</sup>, Zamir Mera<sup>2</sup>, Ramiro Rosero<sup>3</sup>, Fausto Tapia<sup>4</sup>, Rommel Imbaquingo<sup>5</sup>, Jordán Ramirez<sup>6</sup>

### Resumen

Las ciudades de Latinoamérica tienen problemas de contaminación y tráfico por la falta de investigación y planificación del sector de transporte. En Ecuador, las características de las flotas de transporte y su cinemática en la ciudad no se han determinado. El presente estudio analiza detalladamente las características cinemáticas de cada ruta de transporte público de la ciudad de Ibarra-Ecuador mediante el uso de equipos de georreferenciación GPS para cada segundo de recorrido. Se monitoreó 22 rutas de autobuses urbanos, evaluando 186 autobuses en 832 viajes, en los que se determinó que la velocidad promedio, la aceleración y desaceleración dependen, principalmente, de tres factores: ruta, sector de la ciudad y modelo de vehículo. Otros factores como operadora, edad de conductor, tiempos de viaje y la franja horaria no presentaron mayor significancia en la influencia a las variables cinemáticas en estudio, por lo que no se consideran dentro del estudio de investigación.

### Palabras clave

Cinemática del automóvil, autobuses urbanos, congestión vehicular, estados de conducción, ciclos de conducción.

### Abstract

Latin American cities have pollution and traffic problems due to the lack of research and planning in the transport sector. In Ecuador, the characteristics of the transport fleets and their kinematics in the city have not been determined. This study analyzes in detail the kinematic characteristics of each public transport route in the city of Ibarra-Ecuador using GPS georeferencing equipment for each second of travel. 22 urban bus routes were monitored evaluating 186 buses in 832 trips, where it was determined that the average speed, acceleration and deceleration depend mainly on three factors: route, city sector and vehicle model. Other factors such as operator, age of driver, travel times and time slot did not show greater significance in influencing the kinematic variables under study, so it is not considered within the research study.

### Keywords

Vehicle kinematics, urban buses, vehicle congestion, driving styles, driving cycles.

1 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [farosero@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-0971-1944>]  
2 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [zamera@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-2897-8847>]  
3 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [rarosero@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3094-0197>]  
4 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [fetapia@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7681-2564>]  
5 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [rpimbaquingo@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7140-3374>]  
6 Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. [jaramirez@utn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3629-8756>]

## 1. Introducción

Ante el incremento en la demanda del transporte y la movilidad urbana ha sido necesario analizar y resolver las problemáticas que estas traen consigo. Para ello, se han desarrollado modelos de cinemática vehicular para cumplir con los datos y las limitaciones experimentales, así como para abordar problemas particulares como el consumo de combustible y las emisiones vehiculares. Sin embargo, muchos de estos ciclos tienen limitaciones, por ejemplo, la propuesta de la Comisión Económica para Europa (Davari et al., 2017). En América latina, existen cambios drásticos, hoy en día el aumento en el tráfico urbano y extraurbano no es limitado. Por el contrario, se ha convertido en unos de los más grandes problemas que enfrentan las ciudades en crecimiento. El desarrollo de ciclos de conducción es crítico, ya que predecir éstos, basados en las condiciones de la ruta, muchas veces se ven afectados por varios factores inciertos que tienen un gran impacto en la investigación y tienen una relación directa con el uso de la velocidad (Huang et al., 2017).

El analizar la cinemática vehicular también ha conllevado a estudiar otros parámetros como, por ejemplo, lo relacionado con la contaminación. En el Ecuador, el sector transportista representa un consumo de combustibles de alrededor del 77 %, equivalente a 57 millones de barriles de petróleo, aproximadamente, datos que fueron emitidos por el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos en el 2013 (Sierra, 2016). Pero la cantidad de contaminación generada por este sector aún no tiene una estimación real ya que muchas veces la calidad del combustible, la situación geográfica y el mal uso en la cinemática vehicular, debido a las paradas, arranques y tiempo de espera generados por los hábitos culturales de conductores y pasajeros, indica que difícilmente se tendrá un rendimiento específico para una zona determinada en los sistemas de transporte.

Todos estos tipos de conducción relacionados con los buses de transporte urbano pueden ser obtenidos de diferente manera, siendo el más eficiente el realizado *on-board*, mediante instrumentos adecuados que detectan las condiciones de manejo reales.

Esta técnica fue y es aplicada en la ciudad de Chennai en la India, logrando recopilar datos de velocidad y tiempo mediante dispositivos *on-board* GPS y, de este modo, se obtienen los ciclos de conducción para posteriormente calcular las fracciones de aceleración, desaceleración, velocidad cruceo, desplazamiento y ralentí (Kancharla y Ramadurai, 2018).

Otra técnica es el análisis discriminante lineal basado en la comparación de los parámetros del ciclo de conducción y los datos de conducción del mundo real, esta fue aplicada en el desarrollo de ciclos de conducción en Tianjin. La singularidad de esta metodología se debe a que también se analiza en comparación con metodología tradicional en el desarrollo de ciclos, convirtiéndose así en una investigación que podría ofrecer una nueva metodología para la construcción de ciclos de conducción y referencia para investigaciones relacionadas (Jing et al., 2017).

Estudios también afirman que los factores medioambientales y financieros obligan a desarrollar vehículos limpios, eficientes y sostenibles, siendo la transición a la electrificación e hibridación una posible solución a estos problemas. Sin embargo, los ciclos de conducción también son soluciones, ya que representan las condiciones reales de conducción para las pruebas de emisiones de vehículos y estimación, por lo tanto, crear un ciclo de conducción práctico para vehículos con parámetros característicos como velocidad, distancia, tiempo y aceleración se convierte en algo muy importante, puesto que implica determinar la ruta y luego analizar los datos utilizando técnicas de muestreo estratificado (Kaymaz et al., 2019).

Otros estudios, como por ejemplo el modelo de perfil de velocidad 'sintético' basado en el límite de velocidad de la ruta y los límites de aceleración del autobús, indican que los perfiles de velocidad representativos pueden predecirse por las regulaciones de ruta y los límites cinemáticos del vehículo (Minett et al., 2011).

Así también, en investigaciones previas realizadas se evidencia la obtención de datos de velocidad instantánea versus tiempo, así como datos de georeferenciación GPS que fueron procesados y analizados para desarrollar el ciclo de conducción típico en Hanoi, permitiendo la eficiencia del tránsito de autobuses y la disminución de factores de emisiones de contaminantes atmosféricos como el CO, CO<sub>2</sub>, VOC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y las PM<sub>10</sub> basado en las normas de emisiones internacionales en vehículos (Nguyen et al., 2021).

Por lo tanto, de acuerdo a lo mencionado, se ha llevado a cabo este extenso estudio elaborando una base de datos con las características cinemáticas de cada ruta de transporte público de la ciudad de Ibarra. Se calculó el porcentaje de permanencia promedio de los autobuses en cada estado de marcha (aceleración, desaceleración, ralenti y velocidad crucero) y su relación con los tiempos de viaje y niveles de consumo de combustible. Para el presente estudio, el análisis estadístico se realizó debido a la gran cantidad de datos obtenidos como base de otras investigaciones, entre las cuales se logró realizar el mapa de zonificación de la ciudad de Ibarra, depurar las rutas, generar una tasa de ocupación por ruta, elaborar un análisis de edad promedio, tanto para vehículos como para conductores, y relacionarlo con el consumo de combustible.

## **2. Metodología**

### **2.1. Caracterización de los buses urbanos de Ibarra**

En la ciudad de Ibarra operan dos cooperativas de buses de transporte público: la Cooperativa '28 de Septiembre' y la Cooperativa 'San Miguel de Ibarra'. Se obtuvo información de los vehículos como: marca, modelo y año de fabricación; datos que fueron facilitados por la Empresa Pública de Movilidad (MOVIDELNOR-EP). De la información recopilada se indica un total de 287 vehículos, 160 corresponden a la Cooperativa '28 de Septiembre' y 127 a la Cooperativa 'San Miguel de Ibarra' (Rosero et al., 2017).

Dentro de la caracterización de la flota, y de acuerdo con el modelo de fabricación, se identificaron las marcas que tienen mayor influencia dentro del parque automotor, siendo: Chevrolet Isuzu FTR 32M, Chevrolet Isuzu CHR 7.2 e Hino y Volkswagen 17210. Además, el promedio de año de fabricación de los autobuses es del 2002, por lo tanto, el bus promedio no cumple la Norma de emisiones de gases Euro V y Euro VI (Jääskeläinen y Khair, 2020)

### **2.2. Caracterización de las rutas de Ibarra**

Para la caracterización de las rutas se realizó un inventario de las existentes para las flotas de autobuses de la ciudad de Ibarra. Actualmente, se cuenta con 22 rutas en funcionamiento, 13 rutas de la Cooperativa '28 de Septiembre' y 9 rutas de la Cooperativa 'San Miguel de Ibarra'. Además, se obtienen otros datos como: recorridos, frecuencias, horarios y tiempos de viaje y algunos datos que se muestran en la Tabla 1.

### 2.3. Selección de equipos GPS para monitoreo

El levantamiento de los datos en ruta referentes a velocidad y tiempo para la obtención de estados de conducción para el cálculo de las fracciones de aceleración, desaceleración, velocidad crucero, desplazamiento y ralentí se registraron mediante un dispositivo *on-board* GPS, basándose en la metodología utilizada por Kancharla y Ramadurai (2018).

**Tabla 1.** Caracterización de las rutas de Ibarra

Operadora	Rutas	Distancia (km)	Tiempo (min)
28 de Septiembre	Aloburo	20.38	70
	Arcángel - San Cristóbal	35.26	120
	Azaya - La Campiña	19.23	100
	Caranqui - Aduana	26.75	110
	El Carmen - Bellavista	23.82	75
	Católica - Alpachaca	17.09	90
	Chorlaví - La Victoria	33.71	130
	Milagro - Yahuarcocha	34.84	125
	Naranjito	21.63	100
	Las Palmas - Los Ceibos	19.35	93
	Pugacho - Santa Teresita	19.04	98
	Santa Rosa - Los Ceibos	22.89	110
	Tanguarín - Aduana	36.41	145
San Miguel de Ibarra	Caranqui - Universidades	20.59	75
	Chugchupungo - Florida	24.27	110
	Colinas del Sur - Aduana	25.85	100
	Ejido de Caranqui - Miravalle	28.45	120
	La Esperanza - Hospital Seguro	24.04	115
	19 de Enero - Odilas	29.08	130
	Santa Isabel - H. Familiares	39.22	150
	Santa Lucía - La Victoria	23.99	105
Santo Domingo - Universidades	30.27	120	

Se seleccionó un registrador de datos GL-770 Profesional GNSS Data Logger (Soporte de GPS y GLONASS) conformado por un receptor GPS. Este dispositivo incluye una retroalimentación audible y un sensor de movimiento que genera la máxima duración de la batería. Los datos se pueden obtener con una frecuencia de 1 a 5 Hz, en un rango máximo de 35 horas de funcionamiento. Las pruebas piloto se realizaron para verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas y mejorar las destrezas en la operación de los mismos.

## 2.4. Levantamiento de datos de las rutas

El levantamiento de datos se realizó en temporadas en las que las actividades educativas, laborales, administrativas, sociales y comerciales eran normales, lo que garantizó tener datos representativos en función de las condiciones cotidianas del tráfico de la ciudad. Se monitorearon todas las rutas de Ibarra durante todo el día en tres condiciones diferentes: semana (lunes-viernes), sábado y domingo.

Cada condición es diferente, por lo tanto, conlleva que existan cambios de horarios, frecuencias, rutas y otros factores que afectan el estado de conducción. Logrando registrar 3 600 datos por hora y por equipo.

En total, entre semana se monitorearon 92 buses, de los cuales se obtuvieron 472 viajes y 3 130 908 registros. Para los sábados se monitorearon 39 buses y se obtienen 195 viajes y 1 274 812 registros; mientras que los domingos se monitorearon 37 buses, dando como resultado 165 viajes y 1 108 146 registros. Logrando un tiempo total de grabación de 1 532 horas, aproximadamente.

## 2.5. Definición de variables y parámetros de estudio

Para la determinación de las variables y los parámetros de estudio se toma en cuenta la cinemática del vehículo. Entre las variables y parámetros referenciales tenemos: 1) ubicación (m); 2) tiempo (s); 3) distancia recorrida en cada viaje (m); 4) número de autobuses y 5) número de días de estudio.

A partir de estos parámetros se determinaron las diferentes variables como son: 1) velocidad; 2) velocidad instantánea; 3) velocidad promedio; 4) aceleración instantánea; 5) aceleración y desaceleración promedio; 6) porcentaje de permanencia de los estados de conducción y 7) porcentaje de permanencia promedio de los estados de conducción.

Las condiciones de marcha para los ciclos de conducción son: 1) ralentí: ( $v \leq 2 \text{ km/h}$ ); 2) crucero: ( $-0,1 \text{ m/s}^2 < a < 0,1 \text{ m/s}^2$ ); 3) aceleración: ( $a \geq 0,1 \text{ m/s}^2$ ) y ( $v > 2 \text{ km/h}$ ) y 4) desaceleración: ( $a \leq -0,1 \text{ m/s}^2$ ) y ( $v > 2 \text{ km/h}$ ).

La velocidad instantánea ( $v$ ) en kilómetros por hora (km/h) determinó el estado en que se encuentra el vehículo durante cada segundo. A partir de la Ecuación 1 se calcula la relación distancia versus tiempo en los buses de la ciudad de Ibarra.

$$v_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

$v_i$ : Velocidad instantánea del bus.

$d_i$ : Posición instantánea del vector posición.

$\Delta t$ : Variación del tiempo ( $\Delta t = 1$  segundo).

La velocidad promedio diaria de cada bus se encuentra en función de la sumatoria de la relación de la distancia que recorrieron en un determinado tiempo.

Para el cálculo de la velocidad se usa el promedio diario de la flota de autobuses de Ibarra y se utilizó la Ecuación 2, la cual se encuentra en función de la sumatoria de la velocidad promedio diaria de los buses.

$$V_{\text{PROM DIARIA FLOTA}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{\text{PROM DIARIA BUS}} \quad (2)$$

Donde:

$V_{\text{PROM DIARIA FLOTA}}$ : Velocidad promedio diaria de la flota.

$V_{\text{PROM DIARIA BUS}}$ : Velocidad promedio diaria del bus.

Luego, se recurre a la Ecuación 3 para obtener la velocidad promedio de las rutas totales de la semana de la flota de autobuses urbanos de Ibarra.

$$V_{\text{PROM SEMANAL FLOTA}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^7 V_{\text{PROM DIARIA FLOTA}} \quad (3)$$

Donde:

$V_{\text{PROM SEMANAL FLOTA}}$ : Velocidad promedio semanal de la flota.

$V_{\text{PROM DIARIA FLOTA}}$ : Velocidad promedio diaria de la flota.

$i$  Día de la semana (1 a 5 = entre semana, 6 = sábado y 7 = domingo).

La velocidad instantánea (m/s) se utilizó para determinar los estados de conducción de los choferes tomados en intervalos de un segundo para disminuir el margen de error. A partir de la velocidad instantánea y la aceleración se calcularán los porcentajes de permanencia que ejecutan los conductores en los diferentes estados de marcha del vehículo. Por lo tanto, la Ecuación 4 se utiliza para el cálculo de la aceleración instantánea de los buses.

$$a = \frac{v_f - v_o}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde:

$a$ : Aceleración instantánea del bus.

$v_f$ : Velocidad final.

$v_o$ : Velocidad inicial.

$\Delta t$ : Variación del tiempo ( $\Delta t = 1$  segundo).

Luego, se realizó el cálculo de la aceleración y desaceleración promedio diaria y semanal que experimentan los buses. Los estados de conducción permitieron determinar el comportamiento o estilo de conducción que experimentan los choferes de los autobuses urbanos de Ibarra. Los estados de conducción de ralentí (ER), crucero (EC), aceleración (EA) y desaceleración (ED) se calculan porcentualmente a partir de las Ecuaciones 2, 3, 4 y 5, respectivamente.

$$E_R = \sum_{i=1}^n \frac{T_{Ri}}{T_{Ti}} * 100\% \quad (5)$$

Donde:

$E_R$ : Porcentaje de permanencia en ralentí.

$T_{Ri}$ : Tiempo de permanencia en estado (R ralentí, entre otras.)

$T_{Ti}$ : Tiempo total de viaje.

Estos resultados obtenidos permiten el análisis de los estados de conducción por las siguientes variables: operadora, ruta, modelo de bus, sector de la ciudad, edad del conductor y franja horaria. Por lo tanto, la Ecuación 6 sirve para la determinación de la permanencia promedio en los estados de ralentí, crucero, aceleración y desaceleración, respectivamente.

$$E_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_j \quad (6)$$

Donde:

$E_j$ : Porcentaje de permanencia promedio en ralentí.

$t_j$ : Tiempo de permanencia en estado (R ralentí, etc.)

$i$ : Día de la semana (1 a 5 = lunes a viernes; 6 = sábado y 7 = domingo).

## 2.6. Elaboración y procesamiento de base de datos

Para el procesamiento de los datos se usó el software estadístico *RStudio* y se tomaron las siguientes consideraciones.

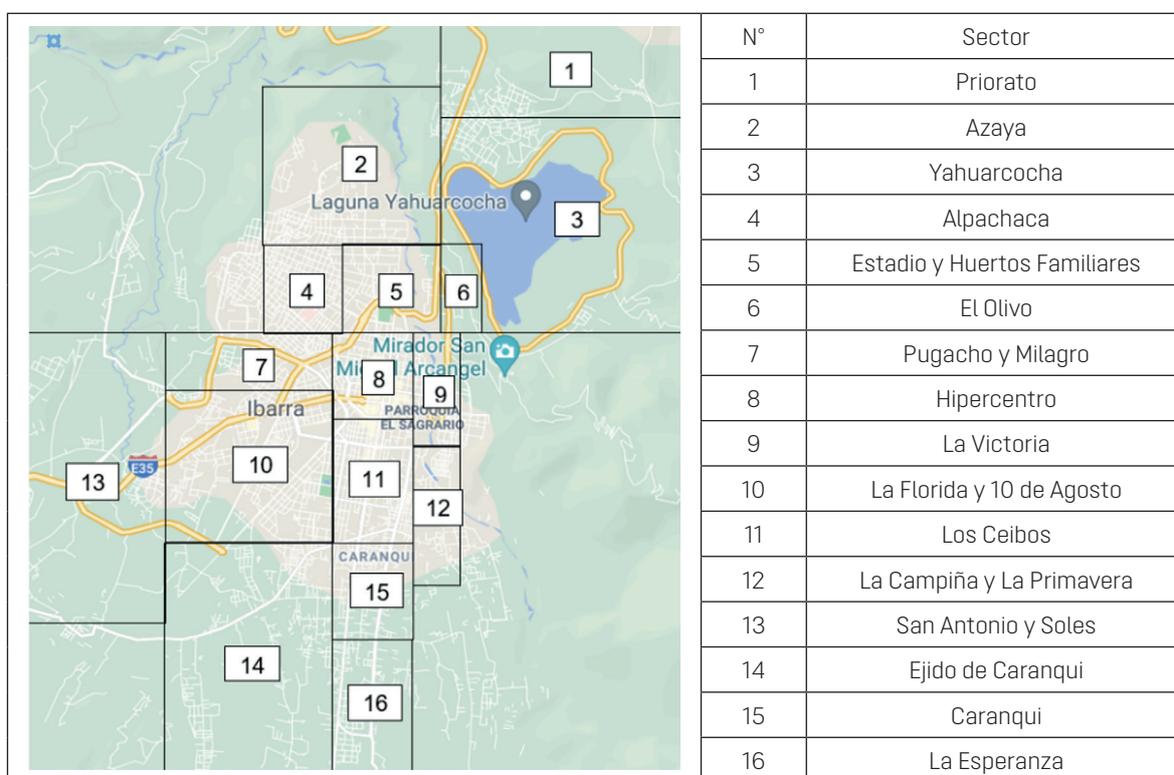
Se consideraron datos inválidos al tiempo de espera que experimentan los buses, comprendido entre la finalización de una vuelta y el inicio de la siguiente. De la información procesada se obtuvo la ruta de estudio, el día en el que se realizó, el número de disco, marca, modelo, año de fabricación, edad del conductor, número de vuelta y tiempos en los diferentes estados de marcha que experimentaron los buses monitoreados.

## 2.7. Obtención de resultados

Para la obtención de resultados se aplicaron códigos de programación en *RStudio* y se determinaron los porcentajes en los estados de marcha en ralentí, crucero, aceleración y desaceleración; así como también las velocidades y aceleraciones máximas y promedios por operadora, ruta, modelo de bus, sector, edad del conductor y horario de operación de los buses. Los *Data Frames* que se utilizan para el análisis de los datos son tres: *Data\_entre semana*, *Data\_sábado* y *Data\_domingo*. Se realizó la sectorización de la ciudad de Ibarra mediante cuadrantes, tal como se muestra en la Figura 1. Además, se determinaron los puntos de latitud y longitud de los sectores más importantes de la ciudad, tomando en consideración variables como: sistema laboral, educativo, comercial, residencial, administrativo, social y cultural.

## 3. Resultados y discusión

Para las tablas 2, 3 y 4 se define la desviación estándar en función del nivel de confianza. Para este estudio los valores promedios fueron obtenidos con un nivel de confianza mayor o igual al 95 % (p igual a 0.05).

**Figura 1.** Sectorización de la ciudad de Ibarra

### 3.1. Análisis cinemático de los estados de conducción de la flota de autobuses

Del tiempo total de operación analizado para las 22 rutas, en la Tabla 2 se definen los estados de conducción general. En promedio, se obtuvo un 29.6% en ralentí, un 15.2 % en velocidad de crucero, el 30.9 % en aceleración y 24.2 % en desaceleración. Primero, se puede advertir que los tiempos de aceleración y desaceleración son similares con una diferencia de 6.7 %. Además, la velocidad de crucero del 15.2 % indica que no se encuentran tramos significativos de velocidad constante dentro de la ciudad. Sin embargo, el tiempo de ralentí 29.6 % es similar al tiempo de aceleración y desaceleración. Los porcentajes de permanencia de los autobuses urbanos de Ibarra no presentaron variaciones en función de la operadora, del modelo de vehículo y de la edad de los conductores, ya que los resultados muestran estilos de conducción similares.

**Tabla 2.** Estados de conducción general

Días	Ralentí (%) ± desviación estándar	Crucero (%) ± desviación estándar	Aceleración (%) ± desviación estándar	Desaceleración (%) ± desviación estándar
Entre semana	29.9 ± 2.12	14.5 ± 1.18	31.3 ± 2.17	24.3 ± 1.12
Sábado	29.2 ± 1.55	16.2 ± 0.81	30.3 ± 1.45	24.3 ± 1.25
Domingo	28.5 ± 0.95	18.0 ± 0.51	29.7 ± 0.85	23.8 ± 0.75
Promedio	29.6 ± 1.54	15.2 ± 0.83	30.9 ± 1.49	24.2 ± 1.02

Los factores que tuvieron incidencia en los porcentajes de permanencia de los estados de conducción son la ruta y el sector de la ciudad.

Por ruta y en estado de ralentí, se analizó el porcentaje de permanencia en el cual los buses se encontraban en ralentí para todas las rutas durante los días entre semana, sábado y domingo, las cuales se muestran en la Figura 2. Se aprecia el estado de ralentí promedio general, el cual es de 29.6 % y se identificó que la ruta que está más tiempo en ralentí entre semana es Católica-Alpachaca (38.3 %). Por otra parte, la ruta que estuvo menos tiempo en ralentí fue Carmen-Bellavista (18.9 %) debido a que en esta ruta se tiene la mayor parte de su recorrido en sectores perimetrales. Para los sábados se mantuvo el mismo orden, mientras que la que menos estuvo en ralentí fue Naranjito (22.3 %). En los domingos, la realidad fue diferente, la ruta que permaneció más tiempo en ralentí fue Católica-Alpachaca (35.2 %) y la que estuvo en menor tiempo en ralentí fue Carmen-Bellavista (16.1 %).

Con respecto al Estado de velocidad crucero se muestra que el porcentaje de permanencia promedio general en velocidad crucero es del 15.2 %. Las rutas con mayor porcentaje son: Naranjito (20.6 %) en los días entre semana, mientras que para el sábado Naranjito tuvo (28.5 %) y para el domingo la ruta Aloburo (27.9 %).

De igual manera, las rutas que se encontraron en menor permanencia de velocidad crucero entre semana fueron: Católica-Alpachaca (11.1 %), para el sábado se mantuvo Católica-Alpachaca (12.3 %) y para el domingo fue 19 de Enero-Odilas (13.3 %).

Para el estado de aceleración por ruta, se ilustra el porcentaje de permanencia promedio general en aceleración que es del (30.9 %). Las rutas en la que más se encontró el estado de aceleración son entre semana Carmen-Bellavista (33.6 %), mientras que los sábados Caranqui-Aduana (32.6 %) y para los domingos Carmen-Bellavista (34.2 %).

Sin embargo, los menores índices de permanencia en estado de aceleración son: entre semana Católica-Alpachaca (27.7 %), sábado Naranjito (25.6 %) y domingo la ruta Santo Domingo-Universidades (29.7 %).

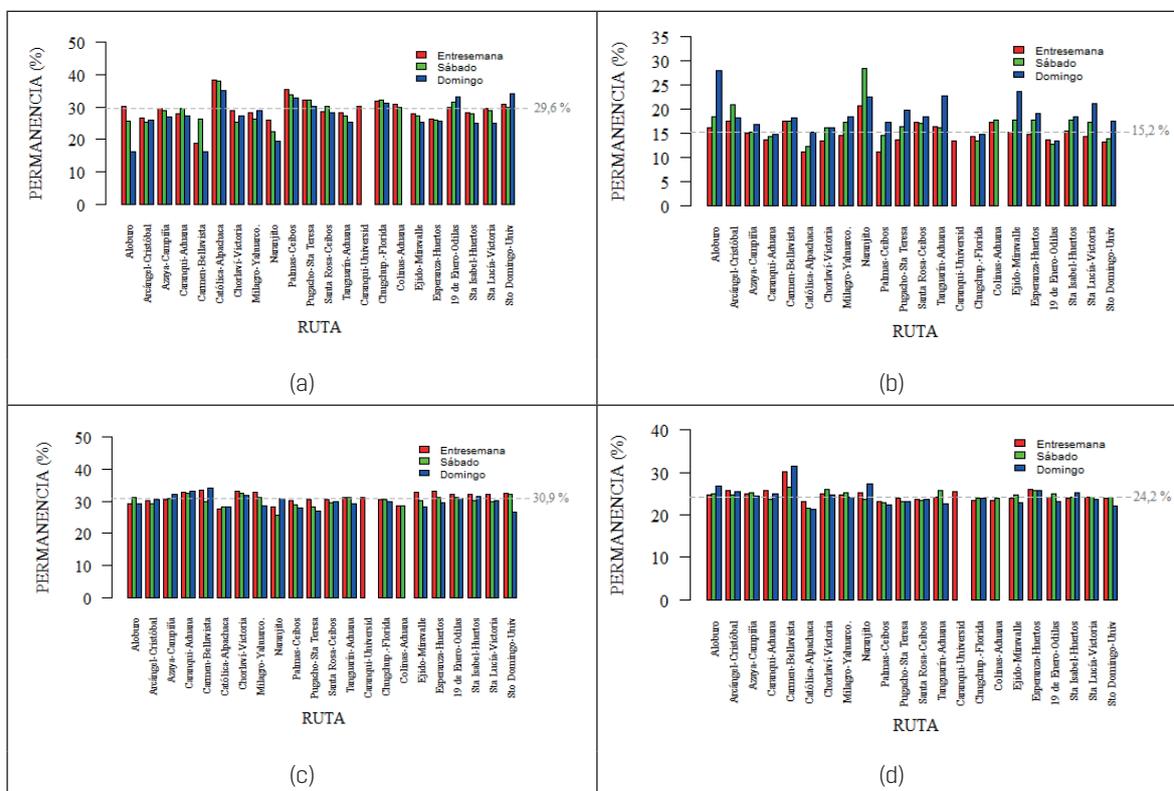
Se aprecia el estado de desaceleración promedio general, el cual es de (24.2 %). Se aprecia que la ruta que experimentó mayor permanencia en desaceleración en todos los días fue Carmen-Bellavista (30.1 %) entre semana, (26.5 %) sábado y (31.5 %) para domingo.

Mientras que la de menor índice de desaceleración fue Católica-Alpachaca (23 %) entre semana, (21.6 %) sábado y (21.4 %) en domingo.

Analizando los estados de conducción en base a los sectores de la ciudad: hipercentro, urbano y perimetral para los periodos entre semana, sábado y domingo, la Figura 3 muestra que entre semana (lunes a viernes) el sector en el cual los buses están más tiempo en ralentí fue en el hipercentro con el (43.4 %) de permanencia, seguido por el urbano con el (22.4 %) y, finalmente, el perimetral (21.4 %).

En el estado de aceleración la parte urbana fue el sector en el cual los buses permanecen más tiempo con un (34.3 %), seguido por la parte perimetral con un (34 %) y, finalmente, el hipercentro con el (25.4 %). En cuanto al estado de conducción en desaceleración el orden fue similar con: (26.1 %) en la parte urbana, (25.8 %) en perimetral y (21.2 %) en hipercentro. La velocidad de crucero tuvo un (18.7 %) en el sector perimetral, (17.3 %) en el urbano y, finalmente, (10 %) en el hipercentro.

**Figura 2.** Permanencia del estado por ruta (a) ralenti (b) velocidad crucero (c) aceleración (d) desaceleración

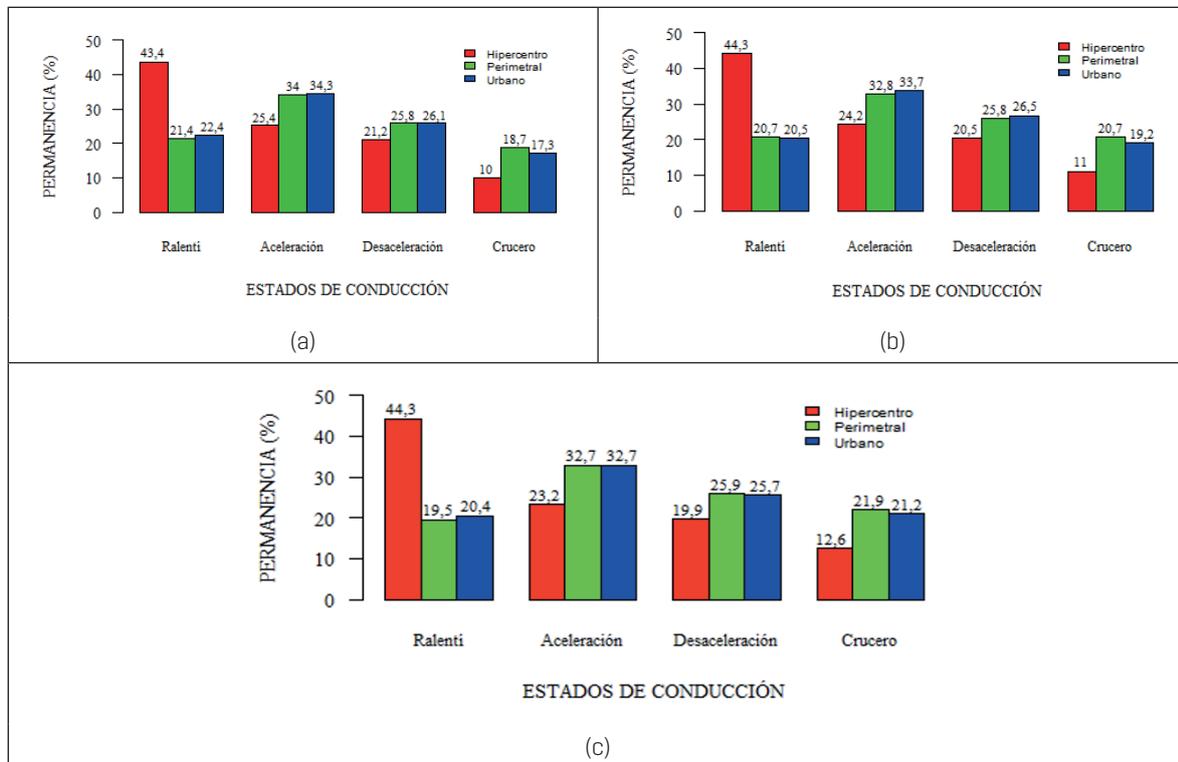


Para el estado de ralenti en los días sábados se muestra que el hipercentro tiene (44.3 %), el perimetral el (20.7 %) y, finalmente, el urbano con el (20.5 %). El estado de aceleración en la parte urbana fue (33.7 %), seguido de la parte perimetral con un (32.8 %) y, por último, el hipercentro con el (24.2 %). El estado de desaceleración fue similar al de la aceleración con (26.5 %) en urbano, (25.8 %) en perimetral y (20.5 %) en hipercentro. La permanencia en velocidad de crucero fue para el sector perimetral con el (20.7 %), seguido del urbano con el (19.2 %) y, finalmente, el hipercentro con el (11 %). Para los domingos, el estado de ralenti fue mayor en el hipercentro con el (44.3 %), el urbano con el (20.4 %) y, finalmente, el perimetral con el (19.5 %). El estado de aceleración en la parte del hipercentro y urbano fue (32.7 %) y, por último, el perimetral con el (23.2 %). En cuanto al estado de conducción en desaceleración el orden fue: el perimetral con un (25.9 %) en la parte urbana (25.7 %) y (19.9 %) en el hipercentro. La velocidad de crucero tuvo un (21.9 %) en el sector perimetral, (21.2 %) en el urbano y, finalmente, (12.6 %) en el hipercentro.

### 3.2. Análisis cinemático de la velocidad máxima y promedio de la flota de autobuses

En la Tabla 3 se observa que los buses alcanzan en promedio una velocidad máxima de 103.63 km/h, equivalente a 13.35 km/h en general para los días considerados entre semana, sábado y domingo. Se pudo identificar que la mayor velocidad fue 108.5 km/h entre semana, 96.15 km/h para los sábados y 86.39 km/h para los domingos.

**Figura 3.** Permanencia de los estados de conducción por sector (a) entre semana (b) sábado (c) domingo



La ruta Tanguarín-Aduana fue la que presentó este mayor incremento de velocidad, en un día entre semana, a una hora pico y con un conductor de edad entre 30 y 39 años, lo cual, según el Artículo 191 del Reglamento General de Aplicación a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, superó considerablemente los límites de velocidad.

**Tabla 3.** Velocidad máxima y promedio general

Días	Velocidad máxima (km/h) ± desviación estándar	Velocidad promedio (km/h) ± desviación estándar
Entre semana	108.583 ± 5.51	13.314 ± 1.22
Sábado	96.156 ± 4.82	13.436 ± 0.81
Domingo	86.396 ± 4.32	13.462 ± 0.57
Promedio	103.638 ± 4.87	13.353 ± 0.87

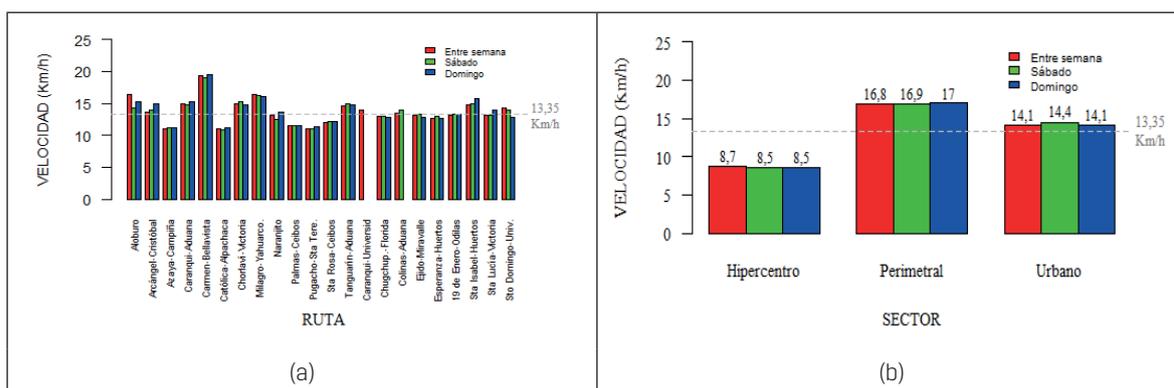
Para los resultados obtenidos no se tuvo mayor variación en función de la operadora, el día, el modelo de vehículo, la edad de los conductores y la franja horaria. Los factores que presentaron incidencia para el análisis de las velocidades fueron la ruta y el sector de la ciudad, nuevamente. Esto indica que las rutas que poseen menor velocidad promedio son aquellas que pasan por sectores urbanos e, incluso, por el hipercentro; mientras que las que adquieren mayor velocidad están conformadas, en gran parte, por tramos perimetrales.

Por ruta y con velocidad promedio se analizó la velocidad promedio para los buses que se encontraron durante los días: entre semana, sábado y domingo, la cual se muestran en la Figura

4. Se aprecia la velocidad promedio general, la cual es de (13.35 km/h) y se identificó que la ruta que genera mayor velocidad entre semana es la Carmen- Bellavista (18.3 km/h). Por otra parte, la ruta que estuvo con menor velocidad fue Católica-Alpachaca (13 km/h).

Para los sábados se mantuvo el mismo orden, Carmen- Bellavista (17.5 km/h). Por otra parte, la ruta que estuvo con menor velocidad fue Católica-Alpachaca (12 km/h) y, para los domingos, los resultados fueron similares, la ruta con mayor velocidad fue Carmen- Bellavista (19 km/h) y la de menor velocidad fue Católica-Alpachaca (12 Km/h).

**Figura 4.** Velocidad promedio (a) ruta (b) por sector



A continuación, por sector se analizaron las velocidades promedio en base a los sectores de la ciudad: hipercentro, urbano y perimetral para los periodos semana, sábado y domingo.

Se muestra que entre semana (lunes a viernes) el sector en el cual los buses presentan mayor velocidad fue la perimetral con (16.8 km/h), en el hipercentro (8.7 km/h), seguido por el urbano con (14.1 km/h).

Para los días sábados, el sector que presenta mayor velocidad fue la perimetral con (16.9 km/h), en el hipercentro (8.5 km/h), seguido por el urbano con (14.4 km/h).

Finalmente, para los domingos el sector que presenta mayor velocidad fue la perimetral con (17 km/h), en el hipercentro (8.5 km/h), seguido por el urbano con (14.1 km/h).

### 3.4. Análisis cinemático de la aceleración y desaceleración promedio de la flota de autobuses

En la Tabla 4 se muestra la aceleración y desaceleración promedio general de los buses, los cuales fueron  $0.158 \text{ m/s}^2$  y  $-0.158 \text{ m/s}^2$ , respectivamente. Entre semana la aceleración promedio es ( $0.16 \text{ m/s}^2$ ), para el sábado ( $0.15 \text{ m/s}^2$ ) y para el domingo ( $0.14 \text{ m/s}^2$ ).

Por otra parte, entre semana la desaceleración promedio es ( $-0.16 \text{ m/s}^2$ ), para el sábado ( $-0.15 \text{ m/s}^2$ ) y para el domingo ( $-0.14 \text{ m/s}^2$ ).

Por lo tanto, esto significa que el estilo de conducción en base a la aceleración y desaceleración promedio tiene un comportamiento igual.

Las mayores variaciones de aceleración y desaceleración promedio se identificaron en base a la ruta, al modelo del vehículo y al sector de la ciudad.

Por ruta, se analizaron la aceleración y desaceleración promedio para los buses que se encontraron durante los días: entre semana, sábado y domingo que se muestran en la Figura 5. Se aprecia que entre semana la aceleración promedio es de  $0.15 \text{ m/s}^2$  y la desaceleración pro-

medio es de  $-0.15 \text{ m/s}^2$ . Se identificó que la ruta con mayor índice de aceleración y desaceleración fue Chorlaví-La Victoria con  $0.182 \text{ m/s}^2$  y  $-0.182 \text{ m/s}^2$ , respectivamente. Y la de menor aceleración y desaceleración promedio fue Naranjito con  $0.13 \text{ m/s}^2$  y  $-0.13 \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

**Tabla 4.** Aceleración y desaceleración promedio general

Días	Aceleración promedio ( $\text{m/s}^2$ ) ± desviación estándar	Desaceleración promedio ( $\text{m/s}^2$ ) ± desviación estándar
Entre semana	$0.163 \pm 0.0079$	$-0.163 \pm 0.0079$
Sábado	$0.153 \pm 0.0076$	$-0.153 \pm 0.0076$
Domingo	$0.141 \pm 0.0071$	$-0.141 \pm 0.0071$
Promedio	$0.158 \pm 0.008$	$-0.158 \pm 0.008$

Por modelo del vehículo se analizaron la aceleración y desaceleración por modelo de vehículo y se aprecia que entre semana la aceleración promedio es de  $0.15 \text{ m/s}^2$  y la desaceleración promedio es de  $-0.15 \text{ m/s}^2$ . Se identificó que los buses Hino GD e Hino RK alcanzan la mayor aceleración y desaceleración promedio de  $0.2 \text{ m/s}^2$  y  $-0.17 \text{ m/s}^2$ , respectivamente, lo que significa que los buses de este tipo trabajan en perfectas condiciones.

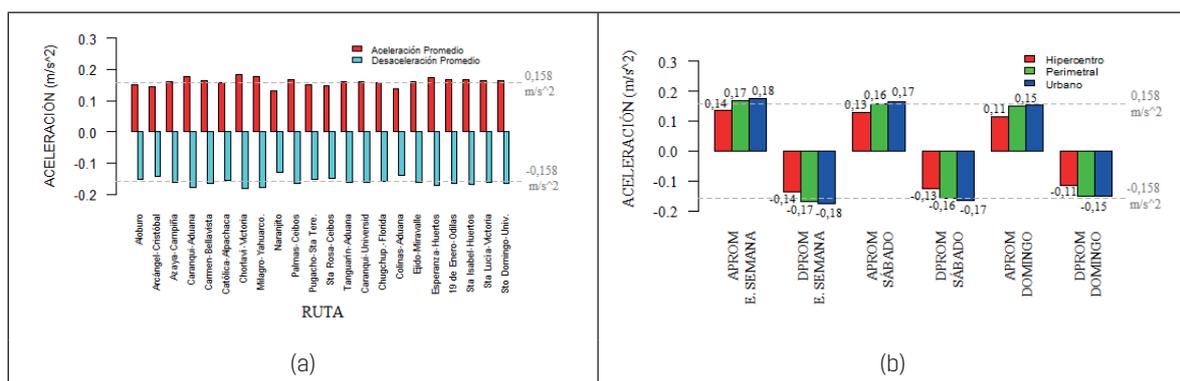
Para los sábados se observa que los buses Hino GD e Hino RK alcanzan la mayor aceleración y desaceleración promedio de  $0.17 \text{ m/s}^2$  y  $-0.17 \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

Para los domingos se observa que los buses Hino FD alcanzan la mayor aceleración y desaceleración promedio de  $0.15 \text{ m/s}^2$  y  $-0.15 \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

Esto significa una reducción en un 13 % en comparación a los días entre semana y en un 11 % en comparación a los sábados.

A continuación, por sector se analizaron las aceleraciones y desaceleraciones promedios en base a los sectores de la ciudad: hipercentro, urbano y perimetral para los periodos semana, sábado y domingo.

**Figura 5.** Aceleración y desaceleración promedio por sector (a) por ruta (b) por sector



Además, se aprecia que los buses generan mayor aceleración y desaceleración promedio cuando se trasladaban por el sector urbano, seguido del sector perimetral, y, finalmente, el hipercentro. Entre semana, la parte urbana presentó una diferencia entre el sector perimetral e hipercentro del 4 % y 22 %, respectivamente. Para sábados, la diferencia del sector urbano con respecto

al perimetral e hipercentro fue del 5 % y 23 %, respectivamente. Y, en cuanto a los domingos, el urbano tuvo una diferencia entre el sector perimetral e hipercentro en 2 % y 24 %, respectivamente.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Los porcentajes de permanencia promedio de la flota de autobuses urbanos de la ciudad de Ibarra fue de 30.9 % en aceleración; 29.6 % en ralentí; 24.2 % en desaceleración y 15.2 % en velocidad crucero. Estos porcentajes de permanencia en los estados de conducción no varían en función de la operadora, del modelo de vehículo, de la edad de los conductores ni de la franja horaria que implica.

Los factores que tuvieron incidencia en los porcentajes de permanencia de los estados de conducción fueron la ruta y el sector de la ciudad. La ruta Católica-Alpachaca presentó la mayor permanencia en ralentí con 38.3 % los días entre semana; la ruta Naranjito tuvo mayor permanencia en crucero con 28.5 % los sábados; la ruta Carmen-Bellavista permaneció más en aceleración y desaceleración con 34.2 % y 31.5 % en los domingos, respectivamente. En el hipercentro fue donde se presentó más tráfico vehicular para todos los días, debido a su mayor permanencia en ralentí de 44 %; mientras que en el sector urbano y perimetral se obtuvieron conducciones similares.

La velocidad promedio de los autobuses fue de 13.35 km/h, los factores que presentaron incidencia fueron la ruta y el sector de la ciudad. Carmen-Bellavista fue la ruta que obtuvo mayor velocidad promedio con 19.5 km/h y el sector perimetral presentó la mayor velocidad promedio de 16.9 %. La velocidad máxima registrada fue de 108.6 km/h en un bus Chevrolet FTR de la ruta Tanguarín-Aduana en un día entre semana a una hora pico y operado por un conductor de edad entre 30 y 39 años.

La aceleración y desaceleración promedio general de la flota de autobuses fue de 0.158 m/s<sup>2</sup> y -0.158 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Las mayores variaciones de aceleración y desaceleración promedio se identificaron en base a la ruta, al modelo del vehículo y al sector de la ciudad. Entre semana, la ruta Chorlaví-La Victoria en el sector urbano obtuvo la mayor aceleración y desaceleración promedio de 0.18 m/s<sup>2</sup> y -0.18 m/s<sup>2</sup>, respectivamente; el Hino GD fue el modelo de bus que adquirió mayor aceleración y desaceleración promedio de 0.21 m/s<sup>2</sup> y -0.21 m/s<sup>2</sup>, respectivamente.

La información obtenida en el presente trabajo puede ser utilizada como dato de entrada para modelos de emisiones (MOOVES, PHEM, IVE, COOPERT), permitiendo la estimación de factores de emisión para vehículos en condiciones de tráfico real.

La investigación futura se centrará en examinar la variación de los patrones cinemáticos de los autobuses para diferentes niveles de tráfico vehicular. Los resultados del estudio pueden ser utilizados como línea base de políticas públicas para el desarrollo de estrategias para reducir el impacto medioambiental generado por los autobuses de transporte público en zonas urbanas.

#### Referencias

- András, V. (2002). The Effects of Small Roundabouts on Emissions and Fuel Consumption: A Case Study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1(7): 65-71. [http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00011-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00011-6).
- Cal, R., Mayor, R., y Asociados. (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte: Estudios de Campo Oferta y Demanda de Transporte Urbano*. Bogotá, Colombia.

- D. Güler. (2016). *Dynamic Analysis of a Double Wishbone Suspension* (Tesis de Maestría). Izmir Institute of Technology.
- Davari, M.; Jerrelind, J., y Stensson Trigell, A. (2017). Energy Efficiency Analyses of a Vehicle in Modal and Transient Driving Cycles Including Longitudinal and Vertical Dynamics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53: 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.019>
- Ericsson, E. (2001). Independent Driving Pattern Factors and Their Influence on Fuel-Use and Exhaust Emission Factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5): 325-345.
- Frey, C., et al. (2007). Comparing Real-World Fuel Consumption for Diesel- and Hydrogen-Fueled Transit Buses and Implication For Emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12: 281-291.
- Hernández, H. (2016). *Caracterización de ciclos de conducción utilizando una tableta Android y bus CAN* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña
- Huang, D.; Xie, H.; Ma, H., y Sun, Q. (2017). Driving Cycle Prediction Model Based on Bus Route Features. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54: 2007-4118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.038>
- Islas, V.; Rivera, C., y Torres, G. (2002). *Estudio de la demanda de transporte*. Instituto Mexicano de Transporte.
- Ivanic, Z. (2007). Data Collection and Development of New York City Refuse Truck Duty Cycle. *SAE World Conference*, Detroit, USA.
- Jääskeläinen, H., y Khair, M. K. (2020). *Emission Standards: Europe: Heavy-Duty Truck and Bus Engines*. <https://Dieselnet.Com/Standards/Eu/Hd.Php>.
- Jing, Z.; Wang, G.; Zhang, S., y Qiu, C. (2017). Building Tianjin Driving Cycle Based on Linear Discriminant Analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.005>
- Kancharla, S., y Ramadurai, G. (2018). Incorporating Driving Cycle Based Fuel Consumption Estimation in Green Vehicle Routing Problems. *Sustainable Cities and Society*, 40: 214-221 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.016>
- Kaymaz, H.; Korkmaz, H., y Erdal, H. (2019). Development of a Driving Cycle For Istanbul Bus Rapid Transit Based on Real-World Data Using Stratified Sampling Method. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75: 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.023>
- Lee, T., y Son, J. (2011). Relationships Between Driving Style and Fuel Consumption in Highway Driving. *SAE Technical Paper*.
- Leon, C.; Rosero, F., y Garzón, L. (2017). Consumo de combustible de las unidades de transporte urbano de la ciudad de Ibarra. Análisis comprensivo de las variables. *Revista Infociencia*, 1(11): 74-79.
- Martínez, J. (2016). *Análisis de emisiones de un vehículo en conducción por ciudad y renovación del sistema PEMS utilizado* (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Madrid.
- Meixueiro, J.; Pérez, M., y Mascle, A. (2009). Guía metodológica para la evaluación de proyectos de transporte masivo urbano. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos.
- Minetola, P.; Iuliano, L., y Calignano, F. (2015). A customer oriented methodology for reverse engineering software selection in the computer aided inspection scenario. *Computers Industry*, 67: 54-71.
- Minett, C., et al. (2011). Eco-Routing: Comparing the Fuel Consumption of Different Routes Between an Origin and Destination Using Field Test Speed Profiles and Synthetic Speed Profiles. *IEEE Society*: 32-39.
- Mira, J., y Arenas, B. (2018). *Aplicación de modelos de redes neuronales al modelo y predicción de emisiones de autobuses urbanos* (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Madrid
- Morales, J. (2014). *Revista iberoamericana de producción académica y gestión educativa*, vol.3, no. 6. Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente, A.C (2014)
- Nguyen, Y., et al. (2021). Emission Characterization and Co-Benefits of Bus Rapid Transit: A Case Study in Hanoi, Vietnam. *Atmospheric Pollution Research*, 12(8): 101148. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101148>

- Posada, J., y Gonzáles, C. (2010). Metodología para estudios de demanda de transporte público de pasajeros en zonas rurales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*: 106-118.
- Quilumba, J. (2015). Diseño de mapas de rutas y señalética para la Cooperativa 28 de Septiembre en la ciudad de Ibarra durante el año 2015 (Tesis de grado). Universidad Técnica del Norte.
- Rohani, M. (2012). *Bus Driving Behavior and Fuel Consumption*. University of Southampton.
- Rosero, F.; Mera, Z.; Rosero, C., y Leon, C. (2017). Análisis del consumo de combustible en autobuses urbanos por efecto de las intersecciones Semaforizadas. Caso de estudio ciudad de Ibarra. *Revista de Investigación Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 10.
- Sierra, J. C. (2016). Estimating Road Transport Fuel Consumption in Ecuador. *Energy Policy*, 92. 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.008>
- Sigettrans. (2015). *Plan Maestro de Movilidad del Cantón Ibarra*. Ibarra
- Silva, J.; Moura, F., Garcia, B., y Vargas, R. (2015). Influential Vectors in Fuel Consumption by an Urban Bus Operator: Bus Route, Driver Behavior or Vehicle Type?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 38: 94-104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.003>
- Wang, Z.; Chen, F.; Fujiyama, T. (2015). *Carbon Emission From Urban Passenger Transportation in Beijing*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41: 217-227.
- Yu, Q., y Li, T. (2012). Influence of Operating Characteristic of On-Road Gasoline Passenger Car on Emission in Nanjing, China. In: *Proceedings of the 12th COTA International Conference of Transportation Professionals*.
- Yu, Q.; Li, T., y Li, H. (2016). Improving Urban Bus Emission and Fuel Consumption Modeling by Incorporating Passenger Load Factor for Real World Driving. *Applied Energy*, 161: 101-111.

# Barras energéticas de sachá inchi: optimización de la formulación mediante diseño estadístico de mezclas

## *(Sacha Inchi Energy Bars: Formulation optimization with Statistical Mix Design)*

Katherine Verduga<sup>1</sup>, Jorge Luis Santamaría<sup>2</sup>, Gilda Gordillo<sup>3</sup>, Carolina Montero<sup>4</sup>

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de optimización en la formulación de una barra energética de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*), aplicando el diseño estadístico de mezclas para el análisis de composición y poder calórico en la barra. Se desarrollaron barras energéticas constituidas por amaranto, quinua, piña deshidratada, avena, miel de abeja y sachá inchi. En cada composición se modificaron las cantidades de: miel de abeja y sachá inchi, seleccionando tres barras con mayor diferencia entre sus composiciones y poder calórico. Al realizar un análisis de aceptabilidad en base a la aplicación de una encuesta, los potenciales consumidores resultaron ser personas entre 19 y 24 años. Además de realizar una evaluación del aporte calórico a todas las barras elaboradas, a la barra con mayor aceptación se efectuó un análisis de composición o proximal sobre el cual se desarrollaron nuevas formulaciones manteniendo el valor de aporte calórico y validando la aceptación por el consumidor en cada nueva formulación. Se concluye que existen diferencias significativas respecto a la aceptación de la barra optimizada y no optimizada, pues la barra no optimizada tiene mayor contenido de sachá inchi que la no optimizada (35 % wt y 30 % wt, respectivamente) y, en cuanto al contenido de miel, la barra no optimizada tiene un contenido superior a la optimizada (30 % wt y 20 % wt, respectivamente). Se obtuvo una alternativa de barra energética que promueve el consumo de cereales y lípidos autóctonos que, además, tienen gran aporte nutricional.

### Palabras clave

Sachá inchi, barras energéticas, diseño de mezclas, optimización, análisis sensorial, poder calórico, *Plukenetia volubilis*.

### Abstract

In this work, the optimization results are presented in the formulation of an energy bar of sachá inchi (*Plukenetia volubilis*), applying the statistical design of mixtures for the analysis of composition and caloric power in the bar. Energy bars consisting of amaranth, quinoa, dehydrated pineapple, oats, honey and sachá inchi were developed. In each composition, the amounts of honey and sachá inchi were modified, selecting three bars with the greatest difference between their compositions and caloric power. When conducting an acceptability analysis based on the application of a survey, the potential consumers turned out to be people between 19 and 24 years old. In addition to performing an evaluation of the caloric intake to all the bars produced, a compositional or proximal analysis was carried out on the bar with the greatest acceptance, on the basis of which new formulations were developed, maintaining the caloric intake value and validating the acceptance by the consumer in each new formulation. Concluding that there are significant differences regarding the acceptance of the optimized and non-optimized bar, since the non-optimized bar has a higher content of sachá inchi than the non-optimized one (35 % wt and 30 % wt, respectively) and in terms of honey content, the non-optimized bar has a higher content than the optimized one (30 % wt and 20 % wt, respectively). An alternative energy bar was obtained that promotes the consumption of native cereals and lipids that also have a great nutritional contribution.

### Keywords

Sachá inchi, energy bars, mix design, sensory analysis, caloric power, *Plukenetia volubilis*.

1 Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. [katherinverduga@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7095-6938]  
2 Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. [jsantamaria@uce.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-3982-2488]  
3 Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. [gggordillo@uce.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-2574-5709]  
4 Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador. [cdmontero@uce.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-3683-8628]

## Introducción

Sacha inchi (*Plukenetia volúbilis*) es una semilla originaria de países como Perú, Brasil, Colombia y Ecuador que tiene propiedades con grandes beneficios para el consumo humano. El grano o almendra presenta alrededor de 48-50 % de aceites y 27-28 % de proteínas altamente digeribles y ricas en aminoácidos esenciales: cisteína, tirosina, treonina y triptófano, excepto leucina y lisina (Follegatti-Romero et al., 2009). Del sacha inchi se obtiene harina y aceite que se utilizan en la elaboración de diferentes comidas y bebidas (Hanssen y Schmitz-Hübsch, 2011) y también se ha utilizado médicamente en el tratamiento reumático y dolencias musculares (Chirinos et al., 2013).

La composición proximal (Tabla 1) de semillas de sacha inchi (Ruiz et al., 2013) puede variar dependiendo del tipo de semilla y las condiciones en las que ésta se encuentre. Existen dos tipos principales de sacha inchi: *Plukenetia volúbilis* y *Plukenetia huayllabambana*, motivo por el cual no se puede generalizar la composición proximal del sacha inchi.

**Tabla 1.** Composición proximal (base seca) de semillas de *Plukenetia*

Componente	Semillas
Grasa	49.00 ±1.00
Proteínas	29.60 ± 0.50
Cenizas	2.70 ± 0.20
Fibra	6.60 ± 0.70
Carbohidratos	12.10 ±1.30

En Ecuador se estima que la siembra de sacha inchi se da en 13 provincias, pero la mayor producción estaría en la provincia del Napo. Cabe mencionar que solo la empresa Agroindustrias Ecuador G2 contaría con 1 100 ha sembradas y 800 ha en producción (Revista Líderes, 2020). La industria de esta semilla está enfocada en la exportación para la producción de subproductos con base en sacha inchi, sin embargo, en los últimos años el Ecuador está destacándose en cuanto a la extracción de aceite, existiendo actualmente la producción y comercialización de derivados como cremas corporales, aderezos para la comida, jabones y bebidas (Cárdenas y Viteri, 2015), lo cual la hace una variedad con alta tendencia de exportación, principalmente a mercados como Corea del Sur y Estados Unidos (Rodríguez et al., 2021). Incluso, a nivel local, la producción de aceite de sacha inchi está siendo considerada como alternativa para el dinamismo de la economía tradicionalmente ligada a la producción de aceite de palma africana (Preciado et al., 2021). Resultados de la caracterización del aceite obtenido por extrusión de semillas de la zona de San Vicente, Manabí (Valdiviezo et al., 2019), presentan un alto contenido de ácidos grasos insaturados (90.63 %) al ser comparado con los resultados obtenidos con semillas provenientes de Perú, aunque el contenido de los ácidos linoleico y oleico resultaron diferentes.

En el presente estudio se propone la utilización de sacha inchi para la elaboración de barras energéticas de consumo en personas entre 19 y 24 años. Las barras obtenidas se caracterizaron para verificar el contenido de humedad y el aporte calórico de los componentes sobre la formulación de la barra.

Se elaboraron nueve barras con diferentes composiciones, las cuales se analizaron aplicando el diseño estadístico de mezclas en el software estadístico Minitab, correlacionando entre la composición y el aporte calórico como variable de respuesta, obteniendo el modelo matemático para la determinación del aporte calórico en función de la composición.

Finalmente, se optimizó la mezcla con la finalidad de aprovechar el aporte calórico del sachu inchi, trabajando, además, sobre las características organolépticas para que sea agradable a los consumidores.

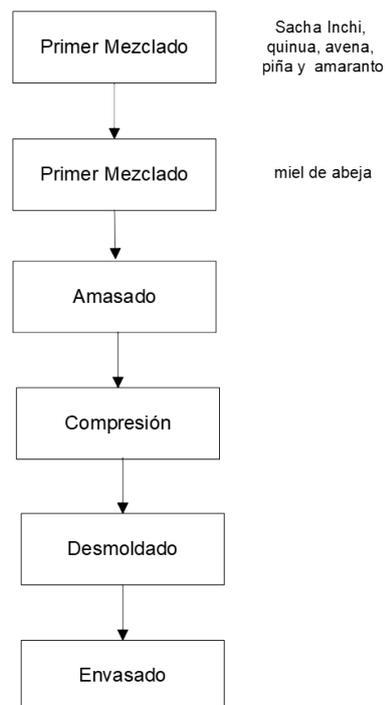
## Metodología experimental

### Formulación y elaboración de la barra energética

La experimentación se realizó en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador (Verduga, 2019). Las formulaciones se basan en composiciones de barras energéticas comerciales considerando el aporte energético de los ingredientes. Se utilizaron seis ingredientes; tres cereales (amaranto, avena y quínoa), piña deshidratada, miel de abeja y sachu inchi. El procedimiento para la elaboración de la barra se basó en la metodología según Ferreyra (Ruiz et al., 2013) y se detalla en la Figura 1. Previo a la formulación de las barras, las semillas de sachu inchi fueron tostadas y troceadas de manera que tengan un tamaño aproximado a los demás ingredientes (entre 3 y 5 mm) y para obtener una mezcla homogénea. Además, se utilizó miel de abeja con la finalidad de que sea aglutinante y proporcione el dulzor característico de este tipo de alimentos. Al no contar con una normativa local específica para las propiedades de barras energéticas, se estableció que los componentes cereales y la piña deshidratada cumplan el contenido de humedad <10 % (Norma Técnica Ecuatoriana NTE 2595:2011 Granolas. Requisitos, 2011).

En la Figura 2 se pueden apreciar las barras energéticas obtenidas a nivel de laboratorio. La composición de las diferentes formulaciones de barras energéticas se presenta en la Tabla 2.

**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de elaboración de barras energéticas de sachu inchi



**Figura 2.** Barras energéticas de sachá inchi formuladas a nivel de laboratorio



**Tabla 2.** Composición porcentual de las barras energéticas

Barra	Sachá inchi, wt %	Miel, wt %	Piña, wt %	Avena, wt %	Amaranto, wt %	Quinoa, wt %
1	30.00	20.00	10.00	13.33	13.33	13.33
2	35.00	25.00	10.00	10.00	10.00	10.00
3	40.00	30.00	10.00	6.66	6.66	6.66
4	40.00	20.00	10.00	10.00	10.00	10.00
5	30.00	25.00	10.00	11.66	11.66	11.66
6	35.00	30.00	10.00	8.33	8.33	8.33
7	35.00	20.00	10.00	11.66	11.66	11.66
8	40.00	25.00	10.00	8.33	8.33	8.33
9	30.00	30.00	10.00	10.00	10.00	10.00

### **Caracterización de las barras energéticas**

Para caracterizar las barras energéticas se determinó el porcentaje de humedad considerando la norma INEN 2595:2011 para granolas (Norma Técnica Ecuatoriana NTE 2595:2011 Granolas. Requisitos, 2011). En este experimento se utilizaron las barras terminadas de 35 g en una estufa. El contenido de cenizas experimental fue realizado siguiendo el procedimiento AOAC 923.03 (Dusán-Sarria et al., 2019) que consiste en colocar en la mufla una cantidad de la barra con masa conocida a varias temperaturas por un tiempo definido para, finalmente, pesar el contenido de materia orgánica residual (cenizas), proceso que se aplicó a las 9 diferentes barras energéticas. El poder calórico superior de las barras energéticas se analizó con la finalidad de medir el aporte energético de las barras formuladas. Este experimento se realizó en la bomba calorimétrica C2000 marca IKA en el Laboratorio del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). El análisis elemental de las barras energéticas se realizó en el equipo VARIO MACRO CUBE del Labo-

ratorio de Catálisis del área de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador. Con los resultados del contenido de oxígeno, hidrógeno, carbono, azufre y nitrógeno se realizó una aproximación del cálculo del poder calórico de las barras energéticas mediante la relación de Gaur-Reed de aplicación en biomásas (Regalado et al., 2017). Al igual que lo explicado para la bomba calorimétrica, estos ensayos permitieron tener una aproximación experimental de las barras energéticas. Adicionalmente, se utilizó la información de la base de datos para alimentos del *United States Department of Agriculture Agricultural Research Service* (USDA Agricultural Research Service, 2012) para determinar el aporte calórico de las barras energéticas en función del poder nutricional de cada uno de los componentes.

### ***Encuesta de aceptabilidad del producto***

Con la finalidad de determinar la aceptación del consumo de las barras de sachá inchi se realizó una encuesta de aceptabilidad tomando como muestra de estudio a jóvenes entre 19-24 años, considerándolos como posibles consumidores de las barras energéticas debido a la demanda energética de esta franja etaria. Se realizó una encuesta de aceptabilidad en la que los posibles consumidores debían probar una a una las barras, tomando agua entre cada una, de manera que se pueda seleccionar cuál de las tres presentaciones de barras preferían. Las barras fueron colocadas de forma aleatoria y con numeración diferente, de manera que no pueda existir ningún tipo de sesgo en la selección. Las muestras a analizar fueron las barras 3, 5 y 8 que presentaron mayores diferencias de aporte energético entre sí. Se realizó un muestreo no probabilístico en el que se seleccionaron los elementos de la muestra de acuerdo con criterios previamente establecidos, este tipo de muestreo se utiliza cuando el probabilístico resulta muy costoso (Otzen y Manterola, 2017). El tamaño total de la población de estudio fue de 120 personas, el cálculo del tamaño de la muestra se realizó considerando la ecuación estadística generalizada de la misma y se obtuvo una muestra de 73 personas, valor que considera un intervalo de confianza del 95 % (Torres et al., 2006).

### ***Análisis de composición o proximal***

Se realizó el análisis proximal o de composición en la barra energética con mayor percepción de aceptación para conocer el contenido de proteína, grasa, cenizas, humedad, fibras, carbohidratos y aporte energético. Además, permite conocer si el valor de humedad no excede el permitido (INEN 2595:2011 2011-07). Este ensayo se realizó en el laboratorio OSP de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador.

## **Resultados y discusión**

### ***Contenido de humedad y cenizas de las barras energéticas***

En la Tabla 3 se presentan los resultados porcentuales de humedad y cenizas de las barras de sachá inchi. Se evidencia que las barras cumplen lo señalado respecto a la humedad de alimentos en la normativa local para galletas, valor que se considera aceptable ya que Ecuador no tiene norma técnica para la elaboración de barras energéticas. Un trabajo previo —en el cual se desarrolló una barra elaborada de avena, cebada y trigo, además de ciruela pasa y

espirulina— reportó un valor de 11.54 % de humedad (Badillo, 2011), superior al reportado en este trabajo. El valor reportado por Badillo es superior al obtenido en este estudio para la barra de sachá inchi, lo cual probablemente se deba a la presencia de ciruelas con mayor contenido de agua.

Para una barra de cereales con maní, jalea de mora y avena (Zenteno, 2014) se reporta un porcentaje de minerales totales de 1.73 %, similar al obtenido en este trabajo, lo que permite evidenciar que parte de este contenido inorgánico en las barras puede deberse al componente oleaginoso como es el maní y el sachá inchi en cada barra, además considerando que la semilla de sachá inchi tiene un 2.70 % de cenizas (Ruiz et al., 2013), mientras que el maní tiene un 3.40 % (Núñez, 2009). La presencia de altos valores de cenizas es un indicativo de posible contaminación de los alimentos en metales, generalmente provenientes de los procesos de producción en recipientes o contenedores metálicos (Márquez, 2014).

**Tabla 3.** Contenido de humedad y cenizas de las barras energéticas de sachá inchi

Número de barra	Porcentaje de humedad	Porcentaje de cenizas
1	6.21	1.78
2	7.07	1.81
3	9.06	1.89
4	6.56	1.73
5	7.27	1.76
6	8.54	1.84
7	6.02	1.75
8	7.41	1.83
9	8.42	1.79

### **Análisis elemental y poder calórico de las barras energéticas de sachá inchi**

El análisis elemental de las barras energéticas permitió conocer el porcentaje de carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y oxígeno de la mezcla. Además, permitió calcular una aproximación del poder calórico de cada muestra mediante la relación de Gaur-Reed que se utiliza para biomásas mediante la ecuación 1 que, en este caso, está siendo utilizada para estimar el aporte calórico que tendrían las barras a consumir.

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0,3491(\%C) + 1,1783(\%H) + 0,1005(\%S) - 0,1034(\%O) - 0,0151(\%N) - 0,0211(\%C_n) \quad (1)$$

En la Tabla 4 se presentan los resultados de análisis elemental, poder calórico calculado con la correlación de Gaur-Reed y poder calórico experimental con el método de bomba calorimétrica.

**Tabla 4.** Resultados del análisis elemental de las barras energéticas

Barra	N, %	C, %	H, %	S, %	O, %	Poder calórico superior calculado, kJ/kg	Poder calórico superior experimental, MJ/kg
1	2.48	47.42	12.61	0.32	37.17	27 520.00	19 766.86
2	2.74	49.31	13.22	0.24	34.50	29 170.00	20 996.86
3	2.25	46.81	13.03	0.19	37.72	27 730.00	20 622.00
4	2.95	49.52	13.08	0.21	34.24	29 080.00	21 044.86
5	2.66	48.21	12.62	0.19	36.32	27 880.00	19 738.86
6	2.48	45.83	13.40	0.14	38.15	27 770.00	20 954.00
7	1.66	41.84	11.81	0.14	44.55	23 860.00	20 828.00
8	2.37	46.63	12.90	0.17	37.94	27 480.00	21 248.86
9	1.95	43.75	12.97	0.14	41.19	26 250.00	19 760.00

Se evidencia que los valores de poder calórico obtenido mediante el método experimental de la bomba calorimétrica son mayores al calculado con la ecuación 1, se puede concluir que la ecuación de Gaur-Reed no se adapta a mezclas de alimentos. El poder calórico obtenido por el método experimental es comparable con valores energéticos (22 070 kJ/kg) reportados para barras comerciales de harina de grillo producidas en República Checa (Adámek et al., 2018).

Sin embargo, del análisis elemental se observa la presencia de una alta proporción de compuestos carbonados relacionados a las moléculas de carbohidratos, proteínas y azúcares propios de la formulación de la barra energética.

#### ***Aporte calórico de las barras formuladas, cálculo en función de los aportes de los componentes***

Con la finalidad de analizar el aporte calórico de las barras energéticas al momento del consumo se realizó el cálculo teórico en función del aporte de cada ingrediente de la mezcla (Tabla 5), tomando como referencia la base de datos proporcionada por en el USDA *Food Composition Databases* (USDA Agricultural Research Service, 2012).

**Tabla 5.** Aporte energético teórico por componente

Componente	Aporte energético, kJ/100g	Aporte energético, kJ/kg
Sacha inchi	2 930.20	29 302.00
Miel	1 272.54	12 725.40
Amaranto	435.34	4 353.40
Quínoa	502.32	5 023.20
Avena	1 029.76	10 297.60
Pina deshidratada	1 255.80	12 558.00

Conocida la composición de la mezcla reportada en la Tabla 2 y los valores teóricos de cada componente para una barra, en la Tabla 6 se muestran los valores de aporte nutricional teórico por cada barra (35 g).

**Tabla 6.** Aporte energético de las barras de sachá inchi (35 g)

Barra	Aporte energético por barra kJ	Aporte energético por barra kcal
1	550.73	131.62
2	593.48	141.84
3	636.23	152.07
4	622.49	148.78
5	557.60	133.27
6	600.35	143.48
7	586.61	140.20
8	629.36	150.42
9	564.47	134.91

Mencionando algunas barras energéticas desarrolladas para el mercado y con objetivo de comparación, se citan desde aquellas dirigidas para deportistas de triatlón (Arruti et al., 2015) formuladas con dátiles, jarabe de glucosa y avena, presentando un aporte energético de 140.70 kcal/35 g; barras energéticas destinadas a deportistas de resistencia (Jijón y Araujo, 2018) constituidas por frutas como higos, manzanas y duraznos, presentando un aporte calórico de 117.00 kcal/35 g, determinando su composición en cantidades de globales de carbohidratos, proteínas y lípidos; barras energéticas de frutos tradicionales de Sudamérica como las barras con base de borjón, presentando un aporte de 376.25 kcal/35 g, hasta aquellas en base a uvilla (Lascano, 2013), presentando un aporte energético de 162.75 kcal/35 g.

Consecuentemente, se observa que las barras de sachá inchi desarrolladas en el presente estudio se encuentran en el intermedio de aporte calórico con respecto a las barras energéticas existentes en el mercado, alcanzando un aporte calórico de hasta 152.07 kcal/35 g de producto, lo cual las harían competitivas respecto a otras barras.

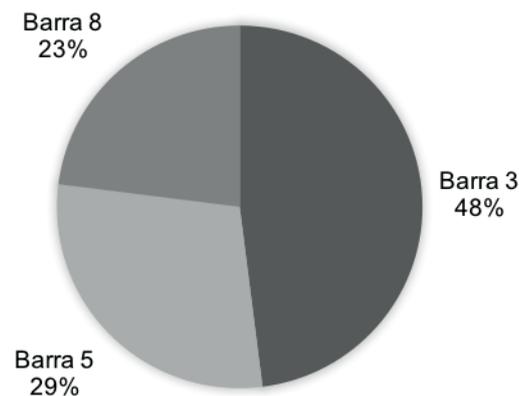
### **Encuesta de aceptabilidad**

En la encuesta de aceptabilidad se seleccionaron las barras 3, 5 y 8 debido a que presentan diferentes composiciones entre sí. La barra 3 contiene 30 % de miel y 40 % de sachá inchi. La barra 5 tiene 25 % de miel y 40 % de sachá inchi. Mientras que la barra 8 tiene 25 % de miel y 40 % de sachá inchi. Los resultados de la encuesta de aceptabilidad de producto se presentan en la Figura 3.

El análisis reflejó una aceptación por la barra 3 que tiene mayor porcentaje de miel de abeja, lo cual refleja que la población encuestada tiene mayor tendencia favorable a los sabores dulces. Nótese que, a pesar de que esta barra contiene mayor porcentaje de sachá inchi, el sabor particular de esta oleaginosa no afectó a la preferencia respecto al dulzor. Estudios sensoriales realizados con barras formuladas con residuos de piña (Manjarrez y Sosa, 2020) concluyeron que las personas prefieren sensorialmente barras energéticas con ingredientes naturales

y un término de dulzor medio. Mientras que barras energéticas basadas en cereales como maíz expandido y germen de trigo obtuvieron muy buena aceptación sensorial en escolares de distintos niveles socioeconómicos en Argentina (Olivera C et al., 2012). Otras barras energéticas basadas en cereales andinos como la quinua tuvieron una calificación de 6/7 por parte del 50 % de encuestados de una muestra de 57 personas entre 11 y 40 años (Steffolani et al., 2017).

**Figura 3.** Resultados de la encuesta de aceptabilidad de las barras energéticas



### Optimización de la formulación mediante diseño estadístico de mezclas

En función de la barra formulada en el laboratorio se ha realizado la optimización de la formulación de una barra con peso 35 g. Y el cálculo del diseño de mezclas se obtuvo realizando el módulo de diseño de mezclas del software Minitab (Minitab, 2021). Para el ajuste de la composición se usó un modelo de tipo  $Y = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \dots \beta_nx_n$ , en el que Y representa el aporte calórico, siendo la variable dependiente;  $\beta$  los coeficientes de ajuste y x los componentes de la mezcla. Los diseños de mezclas permiten analizar una superficie de respuesta (Salamanca et al., 2015) en los que el producto objeto de investigación se compone de varios componentes o ingredientes, estos diseños son utilizados para la elaboración de productos que involucran mezclas. La variable de respuesta va a depender de las proporciones de los componentes. El diseño de mezclas permite establecer los rangos de los valores de cada uno de los componentes de la mezcla, de manera que se define el diseño en función de los componentes. Cuando se tiene el diseño de mezclas, el objetivo de estudio se basa en estudiar si esta mezcla es la óptima, si se ha utilizado un procedimiento numérico y si la solución aproximada es lo suficientemente buena (Camacha Gutiérrez, 2017). La versatilidad de este modelo de experimentos ha permitido su uso en múltiples aplicaciones tan variadas como la optimización de composición orgánica en digestiones anaerobias de residuos sólidos municipales (Song et al., 2021), como en formulación de vegetales fermentados (Chekdid et al., 2021) y alimentos libres de gluten (Ammar et al., 2021). En este trabajo, en la optimización de la formulación mediante diseño estadístico de mezclas, los factores son los componentes. En el caso de las barras energéticas serían el contenido de miel y sachá ynchi y, por consiguiente, sus niveles no son independientes. Al realizar el diseño de mezclas se analiza que modelo se ajuste mejor a los componentes de la mezcla y muestra de forma significativa la interacción entre componentes y la variable respuesta que, en este caso, fue el aporte energético de las barras. Los coeficientes del modelo matemático ( $\beta$ ) permanecen

invariantes con la optimización, puesto que esta se enfoca en la composición de los ingredientes de la mezcla.

### ***Diseño de mezclas en función del poder calórico medido con bomba calorimétrica***

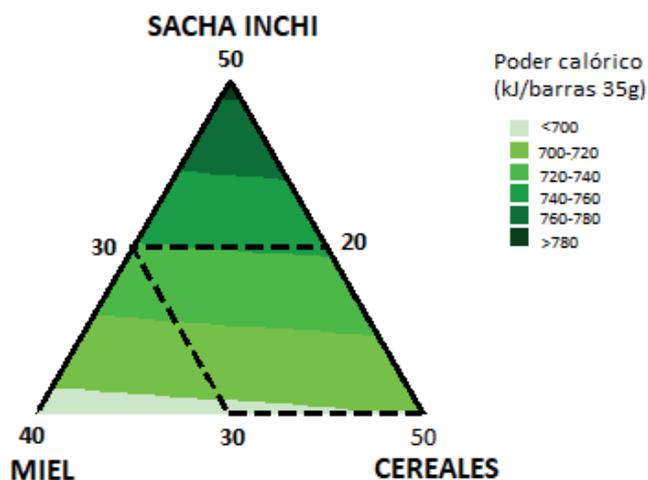
Se busca que el modelo optimice los datos de composición (Tabla 2) y aporte calórico medido experimentalmente con bomba calorimétrica (Tabla 4). El objetivo de analizar estos datos es obtener una correlación entre la formulación de las barras y su aporte energético, obteniendo como resultado la ecuación 2. En este caso, el modelo de mejor ajuste es de tipo lineal debido a que no existe interacción significativa entre el producto de las combinaciones de los componentes de la mezcla.

$$10,0495 * \%Sacha\ Inchi + 5,43651 * \%Miel + 5,79118 * \%Cereales = Poder\ Calorico \left( \frac{kJ}{35\ g} \right) \quad 2$$

Mediante esta regresión se obtiene como resultado del comportamiento de la mezcla una desviación estándar,  $S = 13.08\ %$  y la regresión del modelo,  $R^2 = 72.73\ %$ . La alta variabilidad entre los resultados de composición y poder calórico medidos en la bomba calorimétrica podría deberse a que en el ensayo de poder calórico se asume que la mezcla es una pieza homogénea, lo cual no refleja lo que sucede en mezclas de alimentos. En mezclas de bebidas de frutas en las que se aplicó esta metodología para la predicción de variables (Akonor, 2020) se obtuvieron, para el ajuste de pH que es una propiedad global de la mezcla valores de regresión,  $R^2 = 83.9\ %$ . El parámetro P es el valor que tiene gran influencia en el modelo de regresión, presentando un valor muy cercano al cero para los tres componentes de la mezcla.

Si bien la bondad del ajuste no es la óptima, en la Figura 4 se presenta el gráfico de superficie de contorno de la mezcla que permite conocer la relación entre los componentes y la variable de respuesta. Un color más intenso en la superficie de respuesta corresponde a valores de poder calórico mayores. Por lo que se puede observar que un mayor contenido de sachá inchi promueve valores más altos de poder calórico.

**Figura 4.** Superficie de respuesta del diseño de mezcla de barras de sachá inchi



Trabajos previos que presentan un análisis de varianza (ANOVA) para barras energéticas de similares características (Delgado, 2015) obtienen valores que reflejan que no existiría efecto significativo de las formulaciones experimentadas con respecto a la aceptabilidad general y al aporte energético ( $P > 0.05$ ). En este trabajo se evidencia un comportamiento similar respecto al poder calórico para la barra de sachá inchi. Sin embargo, si existió diferenciación respecto a la aceptación de la barra por parte de los consumidores.

Con los valores residuales de la experimentación (valores experimentales vs valores calculados con el diseño de mezclas) se realizaron pruebas de normalidad con tres métodos, cuyos resultados reflejaron valores 0.05 verificando la normalidad de los datos. Para la prueba de Anderson Darling se obtuvo 0.63, en la prueba de Ryan-Joiner 0.94 y con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, 0.28. Trabajos previos que aplican los métodos de Ryan-Joiner y Kolmogorov-Smirnov (Santamaria et al., 2019) señalan que las dos pruebas confirman la normalidad de los datos, mostrando así que siendo métodos diferentes arrojan respuestas similares, asegurando la fiabilidad de los resultados.

### ***Diseño de mezclas en función del aporte energético de los componentes***

Siguiendo lo señalado en el apartado 4.1, se realizó el diseño de mezclas considerando como factor el aporte energético calculado a partir de los componentes (Método USDA), cuyos valores se encuentran en la Tabla 6. Se obtuvo la expresión de regresión que se observa en la ecuación 3.

$$10,256 * \%Sachá\ Inchi + 4,454 * \%Miel + 3,0801 * \%Cereales = Poder\ Calorico\left(\frac{kJ}{35\ g}\right) \quad 3$$

Los coeficientes de regresión que modelan el comportamiento de la mezcla con los valores de poder calórico expresados en las ecuaciones 3 y 4 no presentan una diferencia significativa. Por lo tanto, evidencian el mismo comportamiento de los componentes en el aporte energético. Sin embargo, el modelo de mezclas presenta una menor desviación estándar,  $S = 0.00035\ %$  y la regresión del modelo,  $R^2 = 100\ %$

### ***Optimización de la composición de la barra de mayor aceptación***

Se consideraron los valores de aporte calórico y se estableció un rango para la optimización de la barra energética que tuvo mayor aceptación. De modo que se pueda tener un producto final que cumpla su función de aporte energético, así como de satisfacción al consumidor. En la Tabla 7 se presentan los límites considerados para la optimización.

**Tabla 7.** Intervalo para la optimización de la mezcla de la barra 3

Aporte calórico(kJ/35 g)		
Valor mínimo	Valor objetivo	Valor máximo
690.87	721.77	743.72

La optimización permitió obtener nuevas composiciones porcentuales, cuyos resultados se presentan en la Tabla 8

**Tabla 8.** Composición de la mezcla optimizada para barra energética de mayor aceptabilidad

Barra 3	Composición optimizada, w %
Sacha inchi	35.16
Miel	20.00
Cereales	44.83

Finalmente, para conocer el efecto de la optimización de la formulación en el producto final se realizó una nueva encuesta de aceptabilidad de la barra 3, probando la formulación original (Tabla 2) y optimizada (Tabla 8). Los resultados de la encuesta de aceptabilidad arrojaron como resultado que el 65 % de encuestados prefieren la mezcla no optimizada y el 35 % prefieren la optimizada. Analizando las diferencias entre las dos composiciones se observa que la barra optimizada tiene un 5 % menos de sachá inchi y un 10 % menos de miel. Por lo cual, se determina que al disminuir el dulzor en la barra optimizada esta no tuvo la aceptabilidad esperada (Manjarrez y Sosa, 2020).

#### **Análisis proximal o composición de la barra con mayor aceptación entre consumidores.**

En la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis proximal realizado a la barra 3 de mayor aceptación, este análisis fue realizado por un laboratorio externo (OSP, Facultad Ciencias Químicas, UCE). Previo al análisis de la muestra se realizó un muestreo utilizando la técnica del cuarteo (Jiménez y Elizondo, 2014).

**Tabla 9.** Análisis proximal de barra energética de sachá inchi

Componente	Porcentaje, wt %
Proteínas	14.21
Grasa	23.93
Cenizas	1.82
Fibra	13.74
Carbohidratos	50.30
Humedad	9.74

Otros autores como Zenteno (2014) presentan el análisis proximal o de composición de una barra de avena de 26 g/barra, en la cual el porcentaje de carbohidratos es de 45.32 %, proteínas de 14.37 % y fibra de 20.56 %. Barras energéticas formuladas con quinua, kiwicha y linaza presentaron valores de proteínas del 11.00 % y de grasa del 26.00 % (Castro et al., 2019).

Contrarrestando con los resultados de este estudio, como se observa en la Tabla 9, se determina que la cantidad de carbohidratos obtenidos son mayores a los de la literatura citada, logrando con este análisis garantizar un aporte inmediato de energía a las personas que consumirán las barras desarrolladas, así como se recalca que las cantidades de proteína y grasa se encuentran entre los mejores valores a pesar de que la cantidad de fibra es menor comparado con las otras barras energizantes citadas. Se puede mencionar que el producto obtenido en este estudio es adecuado para el consumo humano.

## Conclusiones

Se formuló una barra energética a partir de sachá inchi, una oleaginosa propia de Ecuador, la misma que no ha sido aprovechada masivamente en la elaboración de productos con valor añadido. Se han aplicado varios métodos para caracterizar el aporte calórico de barras energéticas, sin embargo, se evidenció que los métodos experimentales como el uso de bomba calorimétrica y el análisis elemental no lograron ser apropiados debido a que la mezcla fue heterogénea. El cálculo del aporte calórico por el método de la USDA, basado en la composición, presenta menor error que los métodos basados en la combustión de la barra. Analizando la relación entre los componentes (miel y sachá inchi) y el aporte calórico, se observa que el contenido de sachá inchi es el que más incide; pero, comparado con barras energéticas analizadas por otros autores, se obtuvo menor contenido energético (152 kcal/barra) y con mayor porcentaje de proteínas (14 %). Respecto a la aceptación del producto se observó una tendencia favorable hacia las barras con mayor porcentaje de miel, el sabor característico herbal del sachá inchi no fue decisivo al momento de la elección por parte de los consumidores. El modelo estadístico de mezclas permitió obtener una correlación (ecuación 3) con una bondad de ajuste que permitirá estimar el aporte calórico de la barra energética a partir de los componentes, permitiendo extrapolar este proceso a nivel industrial y brindando una herramienta estadística validada para los productores de este tipo de alimentos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador por las facilidades para el desarrollo del presente trabajo. K. Verduga agradece al Laboratorio del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) por las facilidades en el uso de la bomba calorimétrica.

## Referencias

- Akonor, P. (2020). Optimization of a Fruit Juice Cocktail Containing Soursop, Pineapple, Orange and Mango Using Mixture Design. *Scientific African*, 8: e00368. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00368>
- Ammar, I., et al. (2021). Optimization of Gluten-Free Sponge Cake Fortified With Whey Protein Concentrate Using Mixture Design Methodology. *Food Chemistry*, 343: 128457. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128457>
- Arruti, I.; Fernández, M., y Martínez, R. (2015). Diseño y desarrollo de una barra energética para deportistas de triatlón. *Enfermería: Cuidados Humanizados*, 4(1): 27-31. <https://doi.org/10.22235/ECH.V4I1.528>
- Adámek, M., et al. (2018). Acceptability and Sensory Evaluation of Energy Bars and Protein Bars Enriched With Edible Insect. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1): 431-437. <https://doi.org/10.5219/925>
- Badillo, M. (2011). *Elaboración de una barra energética con cereales como: avena, cebada y trigo, adicionando espirulina y ciruela pasa* (tesis de grado). Universidad UTE, Ecuador. <http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/4914>
- Camacha Gutiérrez, I. (2017). *Diseño óptimo de experimentos para modelos de mezclas aplicados en la ingeniería y las ciencias experimentales* (tesis de doctorado). Universidad Castilla La Mancha, España. [https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/16595/TESIS\\_García-Camacha\\_Gutiérrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/16595/TESIS_García-Camacha_Gutiérrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Cárdenas, V., y Viteri, J. (2015). *Elaboración y caracterización de una bebida a partir de la semilla de sachá inchi* (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/5982>
- Castro, L., et al. (2019). Optimization in the Elaboration of an Energy Bar Based on Germinated Guinoa (Chenopodium quinoa Willdenow). *Agroindustrial Science*, 9(2): 163-172. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.02.09>
- Chekidid, A. A., et al. (2021). Mixture Design Applied for Formulation and Characterization of Vegetal-based Fermented Products. *LWT*, 146: 111336. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111336>
- Chirinos, R., et al. (2013). Sachá Inchi (Plukenetia volubilis): A Seed Source of Polyunsaturated Fatty Acids, Tocopherols, Phytosterols, Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity. *Food Chemistry*, 141(3): 1732-1739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.078>
- Delgado, L. (2015). Efecto de la proporción de chenopodium quinoa (Quinoa), Amaranthus Caudatus (Kiwicha) y Plukenetia Volubilis L. (sachá inchi) en la aceptabilidad general y el análisis proximal de una barra energética. *Cientifi-K*, 2(2): 56-70.
- Dussán, S.; De la Cruz, R., y Godoy, S. (2019). Study of the Amino Acid Profile and Proximal Analysis of Extruded Dry Pastas Based on Quinoa Flour and Peach Palm Flour. *Informacion Tecnologica*, 30(6): 93-100. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600093>
- Follegatti, L., et al. (2009). Supercritical CO<sub>2</sub> Extraction of Omega-3 Rich Oil From Sachá Inchi (Plukenetia volubilis L.) Seeds. *Journal of Supercritical Fluids*, 49(3): 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.03.010>
- Hanssen, H., y Schmitz, M. (2011). Sachá Inchi (Plukenetia volubilis L.) Nut Oil and Its Therapeutic and Nutritional Uses. In *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention* (pp. 991-994). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375688-6.10117-3>
- INEN-Norma Técnica Ecuatoriana NTE 2595:2011 Granolas. Requisitos, (2011). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2595.pdf>
- Jijón, G., y Araujo, P. (2018). *Formulación y elaboración de una barra energética para deportistas de resistencia* (tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16223>
- Jiménez, M., y Elizondo, F. (2014). Método de reducción de muestra para ensayos de laboratorio en mezcla asfáltica en caliente. *Métodos y Materiales*, 4(1): 11-16. <https://doi.org/10.15517/mym.v4i1.21096>
- Lascano, A. (2013). *Aprovechamiento de los residuos insdustriales de uvilla (Physalis peruviana) para la elaboración de barras energéticas en la asociación artesanal Tierra Productiva*. (tesis de maestría). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/8586>
- Manjarrez, Y., y Sosa, M. (2020). Análisis sensorial de una barra energética desarrollada a partir de cáscaras de piña (Ananas comosus). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5: 474-478.
- Minitab, R. (2021). *Diseño de mezcla - Minitab*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/mixture-designs/what-is-a-mixture-design/>
- Márquez, M. (2014). *Refrigeración y congelación de alimentos: terminología, definiciones y explicaciones*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Núñez, R. (2009). *Evaluación de dos variedades de maní (Arachis Hypogaea) a dos temperaturas de tostado en la elaboración de mantequilla*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Olivera C, M., et al. (2012). Desarrollo de barras de cereales nutritivas y efecto del procesado en la calidad proteica. *Revista Chilena de Nutrición*, 39(3): 18-25. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182012000300003>
- Otzen, T., y Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1): 227-232. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>

- Preciado, J., et al. (2021). Condiciones de mercado para la demanda nacional del sachá inchi en Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 27(1): 290-301. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7817699&info=resumen&idioma=ENG>
- Regalado, D.; Marin, K., y Montero, C. (2017). *Determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas* (tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Ecuador. <http://200.12.169.19/bitstream/25000/11535/1/T-UCE-0017-0026-2017.pdf>
- Revista Líderes. (2020, January 23). Agroindustrias Ecuador G2 crece con el aceite de sachá inchi. <https://www.revistalideres.ec/lideres/industrializacion-sacha-inchi-planta-empresa.html>
- Rodríguez, J.; Vega, K., y Solorzano, S. (2021). Aceite de sachá inchi: potenciador de exportaciones no tradicionales en el Ecuador. *Revista Científica de Investigación Actualización del Mundo de Las Ciencias*, 5(1): 491-510. [https://doi.org/10.26820/RECIAMUC/5.\(1\).ENE.2021.491-510](https://doi.org/10.26820/RECIAMUC/5.(1).ENE.2021.491-510)
- Ruiz, C., et al. (2013). Análisis proximal, antinutrientes, perfil de ácidos grasos y de aminoácidos de semillas y tortas de 2 especies de sachá inchi (*Plukenetia Volubilis* Y *Plukenetia Huayllabambana*). *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 79(1): 29-36.
- Salamanca, G., et al. (2015). Diseño experimental de mezclas como herramienta para la optimización de cremolácteos de mango. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2(1): 16-24. <https://doi.org/10.23850/24220582.166>
- Santamaria, J.; Huerta, G., y Valentin, V. (2019). Quantifying the Effect of Construction Site Factors on Concrete Compressive Strength Using Designed Experiments. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, 6(1): 26. <https://doi.org/10.1504/ijedpo.2019.10018636>
- Song, Y., et al. (2021). Application of Mixture Design to Optimize Organic Composition of Carbohydrate, Protein, and Lipid on Dry Anaerobic Digestion of OFMSW: Aiming Stability and Efficiency. *Biochemical Engineering Journal*, 172: 108037. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108037>
- Steffolani, M., et al. (2017). Evaluation of Technological, Nutritional and Sensory Quality of Cereal Bars with Quinoa. *AgriScientia*, 34(2): 33-43. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v34.n2.19039>
- Torres, M.; Paz, K., y Salazar, F. (2006). Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. *Boletín Electrónico*, 02: 1-13. [http://moodlelandivar.url.edu.gt/url/oa/fi/ProbabilidadEstadistica/URL\\_02\\_BAS02\\_DETERMINACION\\_TAMAÑO\\_MUESTRA.pdf](http://moodlelandivar.url.edu.gt/url/oa/fi/ProbabilidadEstadistica/URL_02_BAS02_DETERMINACION_TAMAÑO_MUESTRA.pdf)
- USDA Agricultural Research Service. (2012). *Food Surveys Research Group*. Beltsville Human Nutrition Research Center. <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/beltsville-md-bhnrc/beltsville-human-nutrition-research-center/food-surveys-research-group/docs/main-service-page/>
- Valdiviezo, C.; Romero, L., y Bonilla, S. (2019). Caracterización del aceite de la semilla de sachá inchi (*Plukenetia Volubilis*) del cantón San Vicente, Manabí, Ecuador, obtenida mediante procesos no térmicos de extrusión. *La Granja*, 30(2): 77-87. <https://doi.org/10.17163/LGR.N30.2019.07>
- Verduga, K. (2019). *Elaboración de una barra energética a partir de sachá inchi* (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19677>
- Zenteno, S. (2014). Barras de cereales energéticas y enriquecidas con otras fuentes vegetales *Revista de Investigación Universitaria*, 3(2): 58-66. <https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riui/article/view/678>

## Gestión del Gobierno Abierto y uso del portal de transparencia en una universidad pública peruana

### *(Management of Open Government and Use of the Transparency Portal in a Peruvian Public University)*

John Ruiz-Cueva<sup>1</sup>, Lloy Pinedo-Tuanama<sup>2</sup>, Percy Barbarán-Mozo<sup>3</sup>, Luis Pretell-Paredes<sup>4</sup>

#### Resumen

Las universidades peruanas están obligadas a articular sus políticas bajo un modelo de Gobierno Abierto (GA) según la Ley n° 27 806 de Transparencia y Acceso a la Información Pública, con el propósito de garantizar la transparencia de la gestión institucional mediante la implementación de herramientas como portales web que garanticen una participación democrática digital. El objetivo del estudio fue determinar la relación entre la gestión del Gobierno Abierto y el uso del portal de transparencia en una universidad pública peruana. Para ello, se realizó una investigación básica de enfoque cuantitativo y diseño no experimental correlacional. Se aplicó una encuesta a través de dos cuestionarios a una muestra de 48 trabajadores encargados de publicar información. Los resultados y conclusiones revelan que el nivel de gestión del gobierno abierto y el uso de portal de transparencia son aceptables, con una correlación directa ( $r=0.5$ ) y con un sig. unilateral igual a 0.000 ( $p$  valor  $<0.01$ ). No obstante, existe desconfianza sobre la gestión del gobierno abierto y la utilidad del portal. Es decir, la institución superior adolece de estrategias o políticas de apertura gubernamental, lo que ocasiona baja participación pública en la gestión del gobierno universitario.

#### Palabras clave

Gobierno abierto, portal de transparencia, participación ciudadana, información pública.

#### Abstract

Peruvian universities are obliged to articulate their policies under an Open Government (GA) model according to Law n° 27 806 on Transparency and Access to Public Information, in order to guarantee the transparency of institutional management, through the implementation of tools, as web portals, that guarantee a democratic digital participation. The objective of the study was to determine the relationship between Open Government management and the use of the transparency portal in a Peruvian public university. To do this, a basic research with a quantitative approach and a correlational not experimental design was carried out. A survey was applied through two questionnaires to a sample of 48 workers in charge of publishing information. The results and conclusions reveal that the level of open government management and the use of a transparency portal are acceptable, with a direct correlation ( $r = 0.5$ ) and with a sig. unilateral equal to 0.000 ( $p$  value  $<0.01$ ). However, there is mistrust about the management of open government and the usefulness of the portal. In other words, the higher institution suffers from strategies or policies of government openness, which causes low public participation in the management of the university government.

#### Keywords

Open government, transparency portal, citizen participation, public information.

1 Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú. [jaruiz@unsm.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-6820-8006>]  
2 Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú. [lpinedo@unsm.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-5569-8739>]  
3 Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú. [pbarbaran@unsm.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-9316-202X>]  
4 Agencia de Promoción de la Inversión Privada (Proinversión). Lima, Perú. [lpretell@proinversion.gob.pe, <https://orcid.org/0000-0002-4989-4346>]

## 1. Introducción

La creciente digitalización en el sector público ha experimentado transformaciones que han sido calificadas como la segunda generación del desarrollo del gobierno electrónico (Estermann, 2018) y con ello la iniciativa bidireccional del Gobierno Abierto (GA) que, según Wirtz et al. (2018) mejora la transparencia institucional a través de la apertura de datos, promoviendo y expandiendo mecanismos de comunicación con el uso de las tecnologías de la información. Este modelo de gobierno es promovido por la Asociación de Gobierno Abierto (AGA) y requiere la participación conjunta de actores gubernamentales y sociedad civil para cumplir con el objetivo de modernización administrativa en un ambiente de democracia digital (Romero, 2019).

Según Castillo Sánchez et al. (2019), las universidades —consideradas instituciones del sector público o privado— están inmersas en el modelo de GA porque demandan del acceso a la información generada por procesos académicos y gestión administrativa. Un medio para incorporar el GA en las instituciones de educación superior es el uso de plataformas o portales web, basado en la participación ciudadana como principio fundamental (Moreno-Carmona et al., 2020) que permite ser transparente en la difusión de resultados científicos, reglamentos, procedimiento administrativos, entre otros (Saraité Sariene et al., 2020). Esta disposición de principios ha fomentado cambios para cumplir con los requisitos del desarrollo social académico responsable.

Para Porumbescu et al. (2020), el GA ha generado estudios de evaluaciones empíricas que demuestran que la realidad de su implementación es afectada por el desconocimiento del flujo de información y la baja comprensión de los ciudadanos, concibiendo la escasa oportunidad de participación. Así también lo manifiestan Wang y Shepherd (2020), quienes descubrieron que las medidas de apertura del GA son inadecuadas si la información es publicada en sitios web a modo informativo en lugar de datos abiertos, perjudicando los principios de transparencia.

En este contexto, Shepherd et al. (2019) evidencian limitantes que afectan la gestión del GA en sectores públicos de Inglaterra en donde se encuentran las instituciones de educación superior. Reflejan la incoherencia en la asignación de responsabilidades para la gestión de la política de datos abiertos, la falta de estándares de metadatos, diferencias en el personal sobre qué datos cargar en los portales, problemas de redundancia, inconsistencia e integridad, entre otros. Según Zuiderwijk y de Reuver (2021), estas dificultades se generan por las barreras críticas de funcionalidad y soporte, calidad y recursos de los datos, legislación, acceso y sostenibilidad.

Frente a ello, en Panamá, Castillo Sánchez et al. (2019) resaltan la pertinencia de asegurar la capacidad de los gestores del GA en estrategias de datos abiertos, considerando que las universidades (como fuentes de información y conocimiento) deben democratizar los datos y robustecer una cultura académica y gubernamental transparente. De acuerdo con Plantinga y Adams (2021), la implementación de GA debe integrar datos de la gestión administrativa, involucrando proactivamente a sus usuarios para así fomentar una participación satisfactoria, cumpliendo las expectativas de obtención de información.

Perú, por su parte, se integra a la AGA desde el 2012 y bajo lineamientos cuenta con una Estrategia Nacional de Datos Abiertos Gubernamentales y un Modelo de Datos Abierto Gubernamentales (Maldonado-Lozano et al., 2020) que compromete al modelo de GA a constituirse en un eje transversal de transparencia y acceso a la información en el marco de la Política Nacional de Modernización de la Gestión Pública articulado a la vigente Ley n° 27 806 de Transparencia y Acceso a la Información Pública (Congreso de la República, 2003); así como al Decreto Supremo n° 063-2010 que aprueba la implementación de portales de transparencia estándar en la administración pública (Presidencia del Consejo de Ministros, 2010).

Sin embargo, pese a la obligatoriedad y esfuerzos desarrollados —rescatando, por supuesto, el crecimiento de la inclusión del GA por las instituciones públicas peruanas (Huamán Huamani, 2020)— los resultados aún muestran deficiencias, ya que a partir del reporte de Vizcarra Mamai et al. (2020) sobre GA se infiere que las entidades públicas incumplen con la divulgación oportuna y completa de la información en sus portales de transparencia, básicamente por la falta de capacidad de los encargados en gestionarlos.

Ahora bien, el presente estudio gira en torno a la problemática que se ha identificado en la Universidad Nacional de San Martín (UNSM), la cual está obligada a publicar información por la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública Art.10 (n° 27 806) y la Ley Universitaria Art.11 (n° 30 220). Se reconoce que desde 2016 dicha institución ha implementado normativas y procedimientos para la actualización de su portal institucional y portal de transparencia. No obstante, la realidad evidencia la publicación parcial de información sobre contrataciones de bienes y servicios, planeamiento, organización y datos generales; así como la inexistencia de información sobre actividades oficiales, registros de visitas a funcionarios, entre otros.

Se propone como objetivo determinar la relación de la gestión del GA con el uso del portal de transparencia en la UNSM a partir de la identificación del nivel de cumplimiento de las mismas y el establecimiento de relaciones entre las dimensiones gestión administrativa, ingeniería del soporte informático, accesibilidad, relevancia y confiabilidad.

Bajo este paradigma se planteó la hipótesis general: existe relación directa y significativa entre la gestión del GA y el uso del portal de transparencia en la UNSM. Cabe resaltar la escasa literatura sobre el contexto del GA relacionado a portales de transparencia en universidades dentro del ámbito nacional e internacional. Pues, en su mayoría, derivan de estudios relacionados a ministerios y gobiernos locales. Por ende, la importancia del presente artículo en el aporte a la comunidad académica y la generación de posibles estudios sobre la misma línea de investigación.

## 2. Metodología

Se empleó un estudio básico de enfoque cuantitativo y diseño no experimental correlacional de corte transversal, ya que se buscó determinar la relación entre las variables: gestión de GA y uso del portal de transparencia en la UNSM en un periodo determinado. Para Arias (2006), este tipo de investigación aporta indicios sobre posibles causas de un fenómeno y su utilidad radica en predecir el valor aproximado de una variable sobre un determinado grupo a partir de la valoración de variables relacionadas.

La población estuvo conformada por 56 trabajadores docentes y administrativos de la UNSM encargados de publicar información en el portal web de transparencia durante el año 2017. Para la selección de la muestra se incluyó a todos los trabajadores designados mediante resolución universitaria y se excluyó a aquellos que, en el momento del estudio y a pesar de la designación mediante acto resolutivo, estuvieron laborando en otras áreas u oficinas. Es decir, se aplicó un tipo de muestreo no probabilístico intencional por accesibilidad, obteniendo una muestra de 48 trabajadores.

Las técnicas de recolección de datos fueron encuesta y uso dos cuestionarios; uno para medir el nivel de gestión del GA que constó de 14 ítems distribuidos en las dimensiones de gestión administrativa e ingeniería del soporte informático; el otro cuestionario sobre el uso del portal de transparencia que constó de 20 ítems dimensionados en accesibilidad, relevancia y confiabilidad. Ambos instrumentos tuvieron como opción de respuesta una escala valorativa

tipo Likert. Además, fueron validados a través del juicio de expertos con una confiabilidad de 0.91 según Alpha de Cronbach.

Los datos recolectados fueron ordenados y procesados con Microsoft Excel y el SPSS versión 22. A partir de ello, se logró aplicar la técnica de estadística descriptiva para el análisis de la frecuencia absoluta, media y desviación estándar. A su vez, según la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson.

Cabe señalar que la información institucional de la UNSM es de acceso público y no existe restricción que sitúe en riesgo a la institución, salvo lo descrito en la Ley n° 27 806 de transparencia y acceso a la información pública en Perú. No obstante, se solicitaron permisos para que los trabajadores seleccionados como unidad muestral de las diferentes oficinas administrativas y académicas brinden las facilidades para la ejecución del estudio.

### 3. Resultados y discusión

La tabla 1 muestra que los datos recopilados y procesados presentan alta dispersión y heterogeneidad según la desviación estándar en las puntuaciones de cada variable. La gestión del GA tuvo una media de 30 puntos y el uso del portal de transparencia es 43.06 puntos, lo que define que la percepción de los docentes y personal administrativo encargados de publicar información en el portal de transparencia de la UNSM fueron diversas.

**Tabla 1.** Medidas estadísticas sobre la gestión del GA y uso del portal de transparencia

Variables	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Gestión del GA	48	31	13	44	30	±6.776
Uso del portal de transparencia	48	42	25	67	43.06	±9.894

Según la tabla 2, en relación a la gestión del GA sobresalió el nivel 'aceptable' (61 %) en cuanto a la gestión administrativa en el plan operativo institucional, estatutos y reglamentos, sistemas de control interno y la asignación de personal y disponibilidad presupuestal. Del mismo modo, para la ingeniería de soporte informático con tiempos definidos para la publicación de información, disponibilidad de equipos informáticos, equipo de trabajo, implementación de sistemas de seguridad, sistemas de respaldo de información y aplicación de los principios de la web 2.0. Sin embargo, se tuvo mínima proporción (4 %) de consideración 'buena' y resaltó además una percepción de 'deficiente' (35 %).

**Tabla 2.** Percepción de la gestión de GA

Nivel	Cantidad	Porcentaje
Buena	2	4 %
Aceptable	29	61 %
Deficiente	17	35 %
Total	48	100 %

Estos resultados evidencian la baja internalización de gestionar políticas de GA por parte de los agentes encargados de velar por el acceso a información transparente, oportuna y con-

fiable al conjunto de académicos, estudiantes y sociedad en general. Por su parte, en México, Vera Martínez (2018) manifestó que las medidas de gestión o planificación de políticas de GA en instituciones públicas aún se encuentran en desarrollo, exponiendo la necesidad de plantear marcos específicos que permitan tomar acciones estratégicas para la gestión eficiente de GA.

En cuanto al uso del portal de transparencia, en la tabla 3 se aprecia que el 54 % del personal docente o administrativo señaló que su utilidad es 'aceptable' en cuanto a la accesibilidad de la información, ya que se publican documentos de planes y políticas institucionales, así como información académica, inversión y obras de infraestructura. Esta percepción fue igual para la relevancia y confiabilidad de la información, puesto que presenta estándares de atención definidos, interoperabilidad de datos, utilidad de información reusable y publicaciones en formatos reutilizables de calidad, consistentes y con la posibilidad de ser corroborada.

Sin embargo, el 40 % de los encuestados consideró que el nivel de uso del portal de transparencia es 'deficiente' y solo una mínima parte (6 %) considera que es 'bueno', deduciéndose que la institución universitaria adolece de robustez informática para la gestión del portal web. Según Zuiderwijk y de Reuver (2021), esto puede deberse a barreras críticas de funcionalidad y soporte o calidad y recursos de los datos, así como la propia legislación, acceso y sostenibilidad. Por lo que las instituciones deben fortalecer la gestión de tecnologías de información para el uso de portales, ya que son recursos pertinentes para la gestión transparente de GA.

**Tabla 3.** Percepción del uso del portal de transparencia

Nivel		Cantidad	Porcentaje
Bueno	60 - 80	3	6 %
Aceptable	40 - 59	26	54 %
Deficiente	0 - 39	19	40 %
Total		48	10 %

### Relación entre la gestión del GA y uso del portal de transparencia

Para responder la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de los datos sobre las puntuaciones de las variables. En esta se obtuvo un nivel de significancia de 0.935 (gestión del GA) y 0.41 (uso del portal de transparencia). Al ser superiores a 0.05 se asume que los datos presentan una distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 4).

**Tabla 4.** Prueba de normalidad

Variables	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Gestión del GA	0.989	48	0.935
Uso del portal de transparencia	0.976	48	0.421

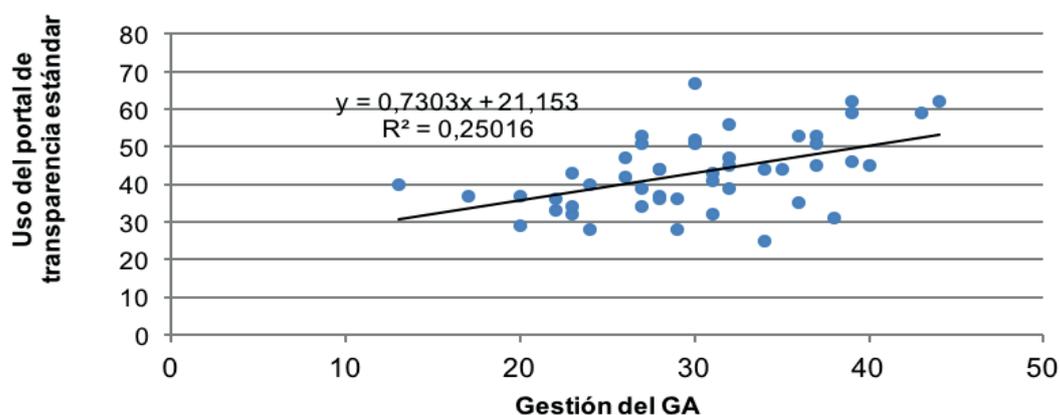
Posteriormente, se realizó la prueba de correlación de Pearson a nivel de variables y dimensiones (Tabla 5). El grado de correlación entre la gestión del GA y el uso del portal de transparencia en la UNSM arrojó un valor de  $r=0.5$ . Es decir, existe correlación moderada con

dirección positiva con un sig. equivalente a 0.000 (p valor < 0.01), aceptándose la hipótesis propuesta. Esto significa que las dimensiones de gestión administrativa e ingeniería del soporte informático inciden directamente en el uso del portal de transparencia en sus dimensiones de accesibilidad, relevancia y confiabilidad.

**Tabla 5.** Resumen de las correlaciones respecto a la gestión del GA y el uso del portal de transparencia

Variables y dimensiones		Correlaciones						
		Gestión administrativa	Soporte informático	Gestión del GA	Accesibilidad	Relevancia	Confiabilidad	Uso del portal transparencia
Gestión administrativa	Correlación de Pearson	1	0.330*	0.853**	0.293*	0.341**	0.086	0.298*
	Sig. (unilateral)		0.011	0.000	0.022	0.009	0.281	0.020
Soporte informático	Correlación de Pearson	0.330*	1	0.774**	0.469**	0.533**	0.427**	0.543**
	Sig. (unilateral)	0.011		0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Gestión del GA	Correlación de Pearson	0.853**	0.774**	1	0.455**	0.524**	0.293*	0.500**
	Sig. (unilateral)	0.000	0.000		0.001	0.000	0.022	0.000
Accesibilidad	Correlación de Pearson	0.293*	0.469**	0.455**	1	0.586**	0.694**	0.936**
	Sig. (unilateral)	0.022	0.000	0.001		0.000	0.000	0.000
Relevancia	Correlación de Pearson	0.341**	0.533**	0.524**	0.586**	1	0.611**	0.801**
	Sig. (unilateral)	0.009	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
Confiabilidad	Correlación de Pearson	0.086	0.427**	0.293*	0.694**	0.611**	1	0.838**
	Sig. (unilateral)	0.281	0.001	0.022	0.000	0.000		0.000
Uso del portal transparencia	Correlación de Pearson	0.298*	0.543**	0.500**	0.936**	0.801**	0.838**	1
	Sig. (unilateral)	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
N		48	48	48	48	48	48	48
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (1 cola).								
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (1 cola).								

**Figura 1.** Dependencia entre la gestión del GA y uso del portal de transparencia



La figura 1 muestra que el uso del portal de transparencia en la institución universitaria depende de la gestión del GA en un 25 % y la diferencia (75 %) recae sobre otros factores ajenos a dicha gestión como: el cumplimiento del código de ética, gestión por resultados, cumplimiento de planes operativos anuales, inadecuada selección de personal y alta rotación de personal. Siendo el pilar del GA la transparencia de la información y que el uso del portal es la herramienta para transparentar la información pública, se presenta una baja dependencia. La razón de esta realidad se explica en que la institución ha descuidado el proceso de publicación de información debido a la rotación continua del personal administrativo y autoridades asignados a la gestión del GA, los mismos que desconocen el proceso. Este resultado coincide con lo expuesto por Shepherd et al. (2019), quienes manifestaron que la asignación de responsabilidad para la gestión de políticas de datos abiertos en entidades públicas sin evaluar las capacidades del recurso humano es una irregularidad que persiste en la dificultad del personal para gestionar los portales de transparencia, ocasionando problemas de redundancia e inconsistencia en la información expuesta.

De los resultados presentados en la Tabla 5 se destaca la correlación baja ( $r=0.29$ ) entre la confiabilidad y la gestión del GA con un sig. igual a 0.022 ( $p$  valor  $<0.05$ ). Ello implica que el personal docente, administrativo o sociedad académica y civil desconfían de la gestión institucional bajo el modelo de GA, consecuentemente de la información publicada en el portal de transparencia. Esto genera una participación democrática limitada y afecta los principios de transparencia (Porumbescu et al, 2020).

Por su parte, Vizcarra Mamai et al. (2020) demostraron la existencia de correlación significativa directamente proporcional y positiva ( $r=0.82$ ) entre el GA y la participación ciudadana en una municipalidad peruana. Resultado semejante desde una perspectiva de confiabilidad de la gestión del GA en una institución universitaria. Esto puede deberse a la relación significativa ( $r=0.69$ ) entre el GA y la política gestionada por la municipalidad que guarda relación ( $r=0.85$  con un sig. igual a 0000 ( $p$  valor  $<0,01$ ) entre la gestión administrativa y la gestión del GA.

Bajo esta perspectiva, en Argentina, Cazzolli et al. (2020) sostienen que las instituciones que solo brindan disponibilidad y accesibilidad de información pública en los portales de transparencia sin asegurar la participación del ciudadano en la gestión de gobierno reducen la potencialidad democratizadora del GA. Por consiguiente, Negrete-Huelga y Rivera-Magos (2018) manifiestan que la comunicación es tarea primordial de la apertura gubernamental para que exista colaboración y participación equitativa entre los agentes que gestionan el GA y la sociedad en general.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El nivel de percepción sobre la gestión del GA y el uso del portal de transparencia en la Universidad Nacional de San Martín es aceptable, con un nivel de correlación significativa y moderada ( $r=0.5$  con un  $p$  valor igual a  $0.000 < 0.01$ ). Sin embargo, existe un 25 % de dependencia entre las variables. Esto refleja la baja gesta de estrategias o políticas institucionales para la apertura gubernamental de información pública. Hecho que trasciende la desconfianza del público sobre la gestión del GA y, consecuentemente, la baja participación digital de la sociedad académica y civil.

A partir del estudio, se fundamenta que la iniciativa de GA en una institución superior universitaria debe velar por el principio de transparencia institucional con la accesibilidad, relevancia y confiabilidad de los datos e información publicada en los portales de transparencia

estándar. Para ello, es pertinente fortalecer las capacidades de los agentes encargados de la gestión del GA y garantizar la participación de los ciudadanos mediante estrategias de comunicación que los involucren en la gestión del gobierno democrático.

En ese sentido, esta investigación se constituye como un referente para futuros trabajos que deben centrarse en analizar la gestión del GA en instituciones universitarias desde una percepción más amplia que involucre tanto a funcionarios, docentes, estudiantes y personal administrativo, así como a la sociedad civil. Además, teniendo en cuenta los resultados desfavorables que califican como deficiente gestión del GA y uso del portal de transparencia estándar, se recomienda la realización de estudios aplicados en los cuales se diseñen estrategias o políticas institucionales para la gestión eficiente del GA y así asegurar la participación ciudadana, pilar de la transparencia en la práctica de GA.

## Referencias

- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. Editorial Episteme.
- Castillo, G.; Murillo, D.; Berbey, A., y Álvarez, H. (2019). El acceso a la información: una propuesta en Panamá de Gobierno Abierto enfocados a contenido académico. *Memorias De Congresos UTP*: 113-120. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/2301>
- Cazzolli, A.; Echavarría, C., y Quevedo, C. (2020). Estrategias comunicacionales a partir de dispositivos de Gobierno Abierto en la provincia de Córdoba (Argentina). *Revista de Tecnología y Sociedad*, 10(19): 1-26. <https://doi.org/10.32870/Pk.a10n19.549>
- Congreso de la República. (2003). *Ley n° 27806.- Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública*. Presidencia de Consejo de Ministros. [https://www.peru.gob.pe/normas/docs/ley\\_27806.pdf](https://www.peru.gob.pe/normas/docs/ley_27806.pdf)
- Estermann, B. (2018). Development Paths Towards Open Government. An Empirical Analysis Among Heritage Institutions. *Government Information Quarterly*, 35(4): 599-612. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.10.005>
- Huamán Huamaní, E. (2020). El Gobierno Abierto en el Perú: compromisos y una buena práctica de integridad electoral. Huamán Huamaní. *Saber Servir: Revista de la Escuela Nacional De Administración Pública*, 4: 146-170. <http://revista.enap.edu.pe/article/view/4167>
- Maldonado-Lozano, A; Paredes-Aguilar, L., y Palomino Alvarado, G. (2020). Gestión de Gobierno Abierto en las instituciones públicas: una revisión de la literatura. *Sapientia: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 2(2): 137-152. <https://journals.sapientiaeditorial.com/index.php/SIJS/article/view/82>
- Moreno-Carmona, C.; Feria-Domínguez, J., y Troncoso, A. (2020). Applying the Open Government Principles to the University's Strategic Planning: A Sound Practice. *Sustainability*, 12(5): 1826. <https://doi.org/10.3390/su12051826>
- Negrete-Huelga, K., y Rivera-Magos, S. (2018). Estrategias de comunicación en redes sociodigitales desde la práctica del Gobierno Abierto. *Cuadernos. Info*, 42: 183-196. <https://doi.org/10.7764/cdi.42.1242>
- Plantinga, P., y Adams, R. (2021). Rethinking Open Government as Innovation for Inclusive Development: Open Access, Data and ICT in South Africa. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 13(3): 315-323. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1746046>
- Porumbescu, G., Cucciniello, M., Y Gil-Garcia, J. (2020). Accounting for Citizens When Explaining Open Government Effectiveness. *Government Information Quarterly*, 37(2): 101451. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.101451>
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2010). *Decreto Supremo que aprueba la implementación del Portal de Transparencia Estándar en las Entidades de la Administración Pública*. PMC. [http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4\\_per\\_ds063.pdf](http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_per_ds063.pdf)

- Romero, L. (2019). Una aproximación teórica al Gobierno Abierto. *Cuestiones Políticas*, 34(60): 69-91. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/cuestiones/article/view/29127>
- Saraite, L.; Caba, C., y López, A. (2020). Expanding the Actions of Open Government in Higher Education Sector: From Web transparency to Open Science. *PLOS ONE*, 15(9): 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238801>
- Shepherd, E., et al. (2019). Open Government Data: Critical Information Management Perspectives. *Records Management Journal*, 29(1/2): 152-167. <https://doi.org/10.1108/RMJ-08-2018-0023>
- Vera Martínez, M. (2018). Los datos abiertos y el plan de acción de gobierno abierto en México 2013-2015. *Nósis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 27(54): 1-18. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.2.1>
- Vizcarra Mamai, F., et al. (2020). Gobierno electrónico y participación ciudadana en la municipalidad de Los Olivos 2018. *Revista Inclusiones*, 7: 160-180. <http://www.revistainclusiones.org/index.php/inclu/article/view/1203>
- Wang, V., y Shepherd, D. (2020). Exploring the Extent of Openness of Open Government Data. A Critique of Open Government Datasets in the UK. *Government Information Quarterly*, 37(1): 101405. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.101405>
- Wirtz, B.; Weyerer, J., y Rösch, M. (2018). Citizen and Open Government: An Empirical Analysis of Antecedents of Open Government Data. *International Journal of Public Administration*, 41(4): 308-320. <https://doi.org/10.1080/01900692.2016.1263659>
- Zuiderwijk, A., y de Reuver, M. (2021). Why Open Government Data Initiatives Fail to Achieve Their Objectives: Categorizing and Prioritizing Barriers Through a Global Survey. *Transforming Government: People, Process and Policy*. <https://doi.org/10.1108/TG-09-2020-0271>

# Diseño de un prototipo de robot con geometría Rocker-Bogie

## (Design of a Robot Prototype with Rocker Geometry-Bogie)

Christian Montaleza<sup>1</sup>, Xavier Mayorga<sup>2</sup>, Jimmy Gallegos<sup>3</sup> y Rogelio León<sup>4</sup>.

### Resumen

En la presente investigación se diseña y valida una geometría de suspensión tipo Rocker-Bogie basados en el análisis de grados de libertad para su futura implementación dentro del sector de la industria de exploración espacial. Ello tiene como finalidad principal la recolección, transporte de basura y desperdicios a sectores estratégicos dentro de las instalaciones, sorteando obstáculos de diferente nivel, aunque también podría aplicarse en el área industrial, agrícola y minera, en las que se requiera un sistema robusto y estable. Se parte estableciendo un factor de seguridad determinado a través de coeficientes que involucren seguridad y economía. Luego, se realiza el cálculo de las dimensiones y fuerzas a soportar por los elementos estructurales conocidos como Rocker y Bogie que son los encargados de transmitir el soporte al chasis, además de brindar soporte a las conexiones para los componentes de los ejes y motores para las ruedas. Del diseño y cálculo de estos elementos depende que el prototipo de robot sea capaz de moverse a través de campos irregulares sorteando obstáculos como: anomalías en la superficie, baches, rocas y bordillos. Para la validación del diseño del prototipo se realiza un análisis estático de los elementos estructurales (Rocker y Bogie) por medio del parámetro de Von Mises, obteniendo un nivel de seguridad elevado antes de la ruptura. Posteriormente, se ejecuta la simulación del prototipo en base a una pista creada en el software analizando parámetros de velocidad, aceleración y desplazamientos en los ejes X y Y. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de la simulación basándose, principalmente, en altura y longitud máxima entre eje frontal y posterior, siendo crucial el ángulo máximo de inclinación permisible.

### Palabras clave

Rocker-Bogie, diseño, geometría, robot, simulación.

### Abstract

*In this research a Rocker-Bogie type suspension geometry is designed and validated based on the analysis of the degrees of freedom, for its future implementation within the space exploration industry sector, having as main purpose the collection and transportation of garbage and waste to strategic sectors within the facilities, avoiding obstacles of different levels, although it could also be applied in the industrial, agricultural and mining areas, where a robust and stable system is required. We start by establishing a safety factor, determined through coefficients that involve safety and economy, then we calculate the dimensions and forces to be supported by the structural elements known as Rocker and Bogie, which are responsible for transmitting the support to the chassis as well as providing support to the connections for the axle components and motors for the wheels. The design and calculation of these elements, depends on the robot prototype being able to move through irregular fields avoiding obstacles such as: surface anomalies, potholes, rocks and curbs. For the validation of the prototype design, a static analysis of the structural elements (Rocker and Bogie) is performed by means of the Von Mises parameter, obtaining a high level of safety before rupture. Subsequently, the simulation of the prototype is executed based on a track created in the software, analyzing parameters of speed, acceleration and displacements in the axes X, Y. Finally, the results obtained from the simulation are compared based mainly on height and maximum length between front and rear axles, being crucial the maximum permissible angle of inclination.*

### Keywords

Rocker-Bogie, design, geometry, robot, simulation.

1 Universidad de Jaén. Jaén, España. [cim0001@red.ujaen.es, <https://orcid.org/0000-0003-1101-9527>]

2 Universidad Europea de Madrid. Madrid, España. [21958869@live.uem.es, <https://orcid.org/0000-0001-9840-924X>]

3 Universidad de Jaén. Jaén, España. [jwga0001@red.ujaen.es, <https://orcid.org/0000-0003-3792-0620>]

4 Universidad de Jaén. Jaén, España. [rslj0001@red.ujaen.es, <https://orcid.org/0000-0003-2142-3769>]

## 1. Introducción

Los esfuerzos de la humanidad por estudiar el espacio desde el punto de vista científico y económico se denomina exploración espacial (Hu et al., 2020). La exploración espacial se logra utilizando robots en un ambiente abarrotado de obstáculos con el fin de recabar datos del entorno (Gul et al., 2021). A lo largo de la historia se han desarrollado múltiples exploraciones con diferentes robots (Bogue, R., 2012). Uno de estos robots es el Rocker-Bogie, más conocido como Rover utilizado por la NASA (Karras et al., 2017; Tashtoush et al., 2020).

El propósito de los robots es ayudar, colaborar o incluso reemplazar a los seres humanos en actividades muy detalladas, repetitivas, complicadas, difíciles o peligrosas (Gonzales y Iagnemma, 2017) a través de complejos movimientos con velocidad, fuerza y alto grado de precisión de manera segura y económica (Conte, 2013). Esto se logra con la integración de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y computacionales dentro de un mismo dispositivo programable (Xu y Wang, 2021). El prototipo o geometría dentro de la simulación es el primer paso que se realiza (Misha et al., 2020).

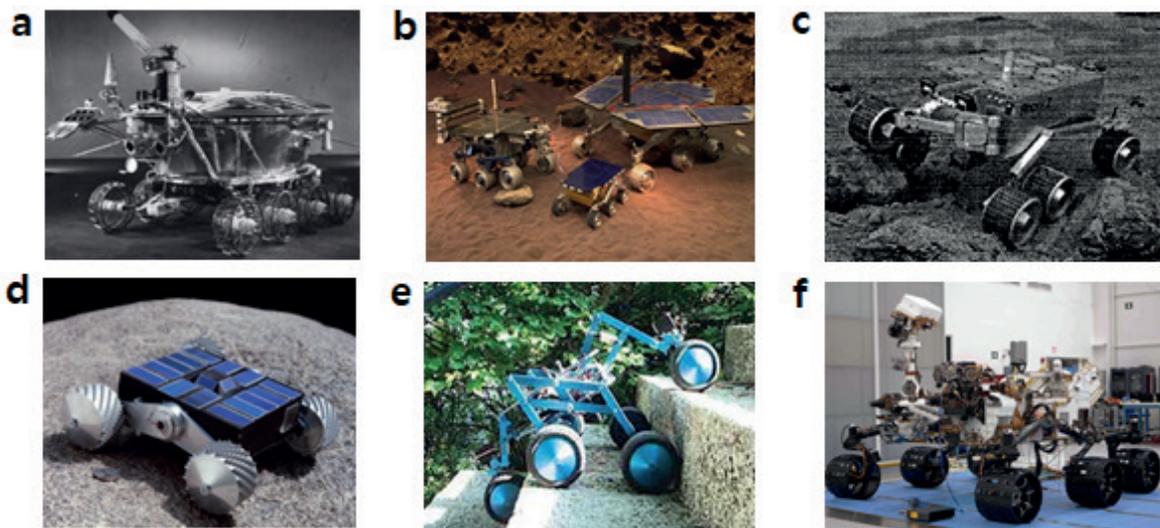
En la figura 1 se observa la evolución de los robots de exploración en cuanto a los últimos 50 años en los que se ha dirigido un esfuerzo sustancial en la investigación hacia el desarrollo de conceptos y prototipos:

- El primer prototipo de exploración lunar fue enviado por la Unión Soviética para la recolección de información del terreno con transmisión de fotos. Este prototipo llamado Lunokhod recorrió unos 10.5 km durante su viaje de 11 meses y tenía un diseño muy precario sin la capacidad de hacer girar las ruedas, por lo que el giro se lograba acelerando la velocidad de rotación de las ruedas en los trenes derechos e izquierdos.
- En 1996 la Nasa diseñó a Rover Sojourner, este robot se asemejaba a un horno microondas con un peso de 10 kg, este sistema le permitía superar los obstáculos superiores hasta 1.5 veces el diámetro de la rueda (Eisen et al., 1998).
- Por otra parte, Rocky 7 presentaba un diseño similar al del Sojourner, se diseñó con un brazo robótico unido al cuerpo para facilitar las investigaciones y su sistema de dirección cumplía con el tipo Ackerman, disminuyendo complejidad, pero comprometiendo su maniobrabilidad.
- Siguiendo este recuento se encuentra Rover SRR, este robot fue diseñado para recoger muestras del suelo y cuenta con un sistema de suspensión activo debido a su ángulo de viraje, en superficies inclinadas la suspensión activa puede mantener el cuerpo principal en ángulo horizontal.
- El robot Nano Rover fue diseñado para la exploración de pequeños cuerpos celestes como los cometas y asteroides. Las pequeñas dimensiones son la ventaja de este robot, consta con 4 ruedas de 6 cm de diámetro, con capacidad de operación en ambos lados, no existe inconveniente en caso de volcamiento (Smith y Saaj, 2009).
- Shrimp Rover fue diseñado con 6 ruedas y un sistema de 4 barras específicas para poder sortear obstáculos de hasta 2 veces el tamaño de sus ruedas sin perder estabilidad. Contiene un Bogie paralelogramo que equilibra las fuerzas de reacción en cada rueda y cuenta con una rueda trasera conectada directamente al cuerpo principal que es accionada por un motor para aumentar la capacidad de escalar (Meghdari et al., 2005).
- Finalmente, *Mars Exploration Rover* (MER), en 2004 se incluyó el envío de 2 robots exploradores idénticos llamados Spirit y Opportunity, su función principal constaba en la bús-

queda de la presencia de agua en rocas y suelos, los robots median 1.6 m de largo, peso de 150 kg y cuenta con el sistema de suspensión llamado Rocker-Bogie (Tunstel, 2007).

- Uno de los últimos robots enviados a exploración en 2012 es el llamado Curiosity, pesa 899 kg con 75 kg de instrumentos científicos, con una longitud de 3 m, ancho de 2.8m, altura de 2.2 m y un brazo robótico de 2.1 m. Su velocidad máxima es de 0.144 km/h al tener un motor eléctrico independiente en cada una de las 6 ruedas que posee (Toupet et al., 2018).

**Figura 1.** Robots Rover de exploración: a) Lunokhod (Sanguino, 2017). b) Sojourner and Opportunity (Sanguino, 2017). c) Rocky 7 (Volpe et al., 1996). d) Nano (Smith, y Saaj, 2009). e) Shripm (Yang et al., 2017). f) Curiosity (Kornfeld et al., 2014)



Sin duda, los robots Rover son mayormente utilizados en exploraciones espaciales debido a su extenso patrimonio (Chinchkar et al., 2017), ya que lo que se busca en el diseño es una geometría tan simple como sea posible (Zheng et al., 2018). En la mayoría de los casos no se requeriría sistema de suspensión, pero no se puede evitar, ya que el sistema de suspensión Rocker-Bogie permite al robot superar obstáculos (Kim et al., 2012). En lo viable, se trata de diseñar una geometría sencilla, reduciendo el coste computacional en la ejecución de la simulación (Cabrera et al., 2021) al incorporar, no solo la geometría del prototipo, sino datos de entrada o contorno con el fin de anticiparse al proceso real, validarlo y, de ser necesario, rediseñarlo para obtener la mejor configuración (Hu et al., 2019).

Esta investigación pretende contribuir primero: con un diseño de geometría relativamente simple y ligera, permitiendo que la movilidad se guarde dentro del espacio limitado disponible. Segundo: implementar una configuración móvil segura para que pueda explorar la superficie. Tercero: que sea capaz de sortear obstáculos de diferente nivel a lo largo de la superficie, manteniendo la estabilidad.

La investigación se compone de una sección de metodología en la que se establecen datos de partida, factor de seguridad y se realizan los cálculos y modelados de piezas estructurales llamadas Rocker y Bogie de dos conceptos diferentes de diseño. Para la validación se realiza un análisis estático en el cual, a través del parámetro de Von Mises, se determina si es capaz

de soportar diferentes esfuerzos. La sección de resultados muestra un análisis dinámico en el que se determina si el prototipo es capaz de sortear obstáculos de diferente nivel. Luego, en la sección de discusión se realiza una comparativa entre los prototipos y estudios ya existentes. Finalmente, en la sección de conclusiones y recomendaciones, aparte de hacer un análisis crítico, se aporta con futuras líneas de investigación que continúen con un análisis más profundo de los robots Rover, como la programación de controladores electrónicos de estabilidad.

## 2. Metodología

Para el diseño del prototipo de suspensión se deben establecer datos de partida como  $m$  (masa total de diseño),  $R$  (radio de la rueda) y  $\theta_{m\acute{a}x}$  (ángulo máximo de inclinación), además de establecer un factor de seguridad ( $n_s$ ) que permita evaluar el coeficiente admisible de seguridad como el producto de dos factores que involucran aquellos determinantes en su valoración (Musto, 2010). La ecuación 1 es tomada del método de A. G Pugsley para determinar dicho factor (Elishakoff, 2017).

$$n_s = n_{sx} * n_{sy} \quad (1)$$

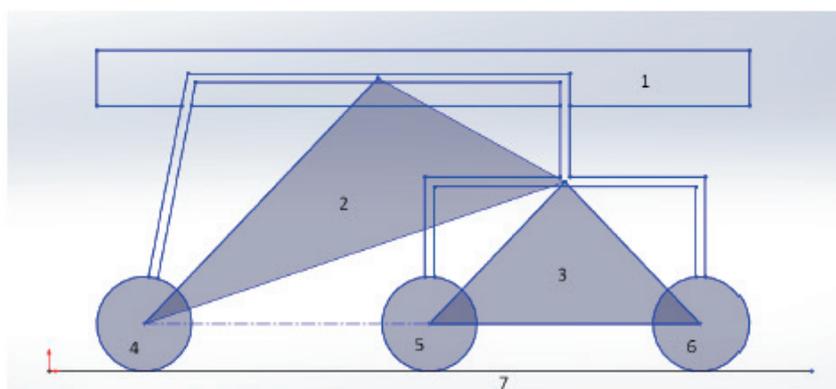
Donde  $n_{sx}$  es el factor de seguridad que involucra aspectos de control y calidad. Y  $n_{sy}$  es el factor de seguridad que involucra aspectos de seguridad y economía.

Se busca que el factor de seguridad de diseño sea mayor que 1 para estar dentro de la normativa de diseño y se pueda continuar con el cálculo de los componentes del sistema de suspensión Rocker-Bogie.

### 2.1 Primer prototipo

En la figura 2 se establecen los grados de libertad que corresponden al mecanismo. Es decir, el número de reacciones de la estructura, obteniendo dicho valor con la ecuación 2.

**Figura 2.** Grados de libertad para el diseño de la geometría Rocker-Bogie

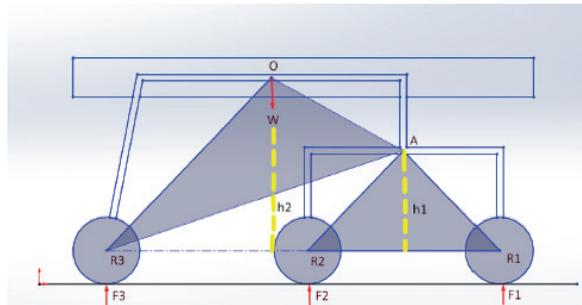


$$m_{gl} = 3(n - 1) - 2 * j_1 - j_2 \quad (2)$$

Donde  $m_{gl}$  son los grados de libertad,  $n$  el número de elementos del mecanismo,  $j_1$  el número de uniones de un grado de libertad,  $j_2$  el número de uniones de dos grados de libertad.

El peso total a soportar por la estructura ( $W$ ) se determina con la ecuación 3. La figura 3 representa el diagrama de cuerpo libre sobre la estructura que forma el Rover, donde  $h1$  es la distancia desde el eje de la rueda hasta el eslabón del Bogie,  $h2$  es la altura desde el centro de las ruedas hasta el eslabón Rocker,  $F1$ ,  $F2$  y  $F3$  serán consideradas como las fuerzas de reacción producidas por la superficie al contacto con las ruedas.

**Figura 3.** Diagrama de cuerpo libre



$$W = m \cdot g \quad (3)$$

Por medio de la sumatoria de fuerzas en A (ecuación 4) y en O (ecuación 5) se calcula las fuerzas de reacción en cada una de las conexiones de los eslabones Rocker-Bogie en los ejes de las ruedas.

$$\Sigma M_A = 0 \quad (4)$$

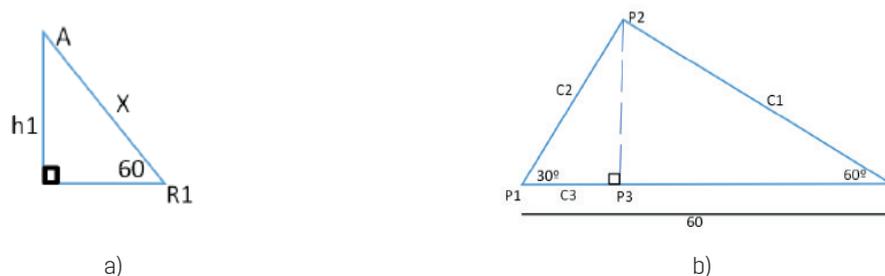
$$\Sigma M_O = 0 \quad (5)$$

La ecuación 6 representa la distancia entre ruedas. Para lo cual se debe establecer el diámetro de la rueda y la longitud total.

$$L_r = \frac{L_t \cdot D_r}{2} \quad (6)$$

Para determinar la altura de los eslabones Rocker-Bogie se realiza un diagrama mediante la separación de triángulos rectángulos, tal como se muestra en la figura 4. Las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 representan a las funciones trigonométricas necesarias para calcular dicha altura.

**Figura 4.** Diagrama de altura de los eslabones: a) eslabón Bogie, b) eslabón Rocker.



$$\cos(60) = \frac{15}{x} \quad (7)$$

$$\sin(30) = \frac{C_1}{60} \quad (8)$$

$$\cos(30) = \frac{C_2}{60} \quad (9)$$

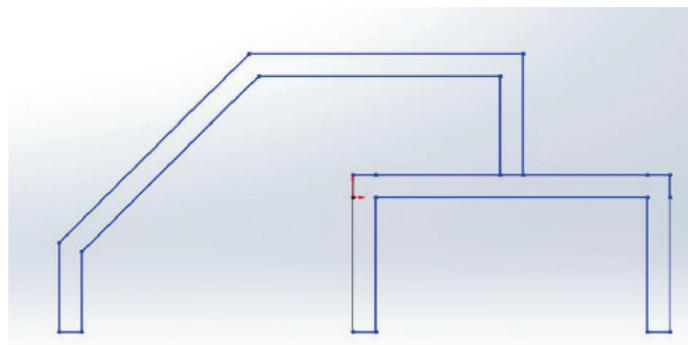
$$\cos(30) = \frac{C_3}{C_2} \quad (10)$$

La ecuación 11 representa la altura Rocker denominada distancia P2P3.

$$\sin(30) = \frac{P2P3}{C_2} \quad (11)$$

La figura 5 muestra el bosquejo de la primera estructura calculada para el diseño de la geometría Rocker-Bogie.

**Figura 5.** Bosquejo principal geometría Rocker-Bogie



La carga en rueda ( $C_r$ ) se determina con la ecuación 12 a través de la carga total ( $C_{Total}$ ) y el número de ruedas del prototipo ( $\# \text{ruedas}$ ). Con este parámetro determinado y con la ecuación 13 se calcula el torque ( $T$ ) necesario para iniciar el movimiento, multiplicando la fuerza ( $F$ ) por la distancia ( $d$ ).

$$C_r = \frac{C_{Total}}{\# \text{ruedas}} \quad (12)$$

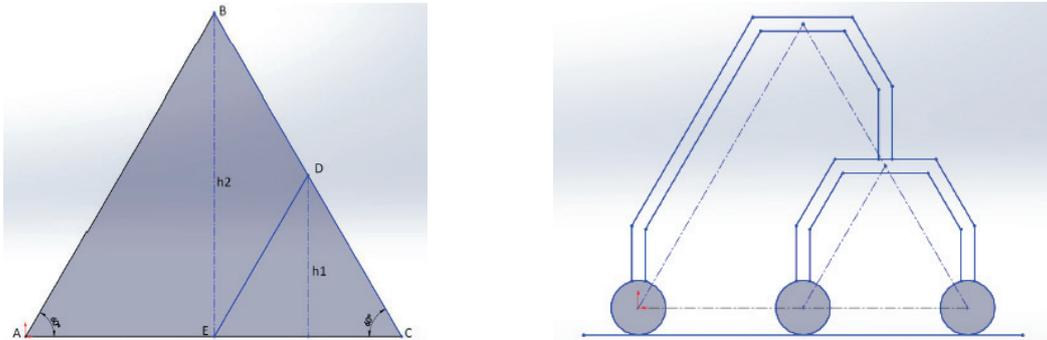
$$T = F*d \quad (13)$$

## 2.2 Segundo prototipo

Repetimos el proceso anteriormente detallado para diseñar un nuevo concepto de geometría Rocker-Bogie, en el cual se consideró un diseño más geométrico como se muestra en la figura 6,

buscando incrementar el ángulo de soporte y distribución de cargas soportadas por las ruedas. Las ecuaciones 14 y 15 permiten determinar la altura de los nuevos eslabones Rocker y Bogie.

**Figura 6.** Diseño y bosquejo de la segunda geometría Rocker-Bogie



$\Delta EDC$

$$h_1 = \sin(60) * (30) \quad (14)$$

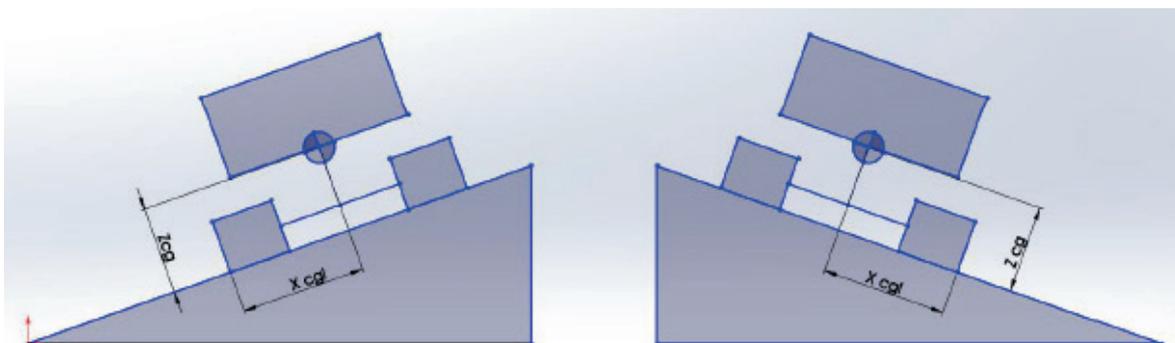
$\Delta BEC$

$$h_2 = \sin(60) * (60) \quad (15)$$

### 2.3 Pendiente

Con los valores establecidos en el diseño de las geometrías se determinan los valores del centro de gravedad de las suspensiones denominadas  $X_{CGL}$  y  $Z_{CG}$ . Se reemplazan los valores en la ecuación 16 que nos permiten calcular el ángulo de inclinación que podrá soportar el diseño. Ver la figura 7.

**Figura 7.** Centro de masa



$$\theta_{m\acute{a}x} = \min \left( \tan^{-1} \left( \frac{X_{CGL}}{Z_{CG}} \right); \tan^{-1} \left( \frac{X_{CGR}}{Z_{CG}} \right) \right) \quad (16)$$

Se busca establecer un ángulo cercano a 30°. Por lo tanto, el diseño, partiendo desde el factor de seguridad, cumple adecuadamente con la geometría diseñada.

## 2.4 Tracción rueda

Para el cálculo de la tracción ejercida por la rueda del prototipo se emplea el coeficiente requerido para la interacción entre material de la rueda en contacto con la superficie en donde se desliza. Se especifica que el coeficiente dinámico es 0.6 correspondiente al rozamiento caucho/madera y materiales del prototipo. Además, con una aceleración promedio de  $0.02 \text{ m/s}^2$ , obteniendo el valor de la fuerza empleada a partir de la ecuación 17 y 18.

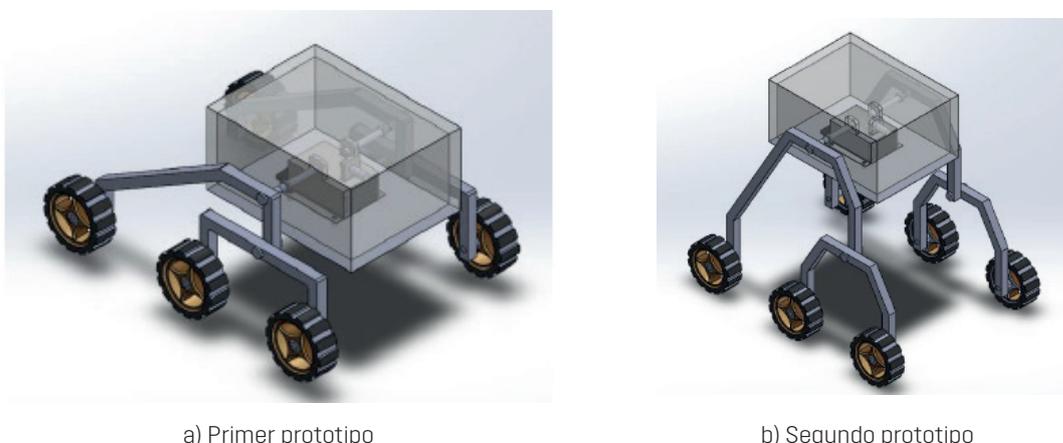
$$\Sigma M_y = 0 \quad (17)$$

$$\Sigma M_z = m * a \quad (18)$$

## 2.5 Diseño CAD

En la figura 8 se observa el modelo CAD del Rover. La parte (a) representa el ensamblaje del primer modelado del sistema Rocker-Bogie que compone el Rover, destacando la ubicación del chasis con mayor cercanía al suelo. La parte (b) representa el ensamblaje del segundo modelado del sistema Rocker-Bogie que compone el Rover, destacando el cuerpo central, el cual debe mantener el equilibrio al pasar cada obstáculo.

**Figura 8.** Modelo CAD Rover



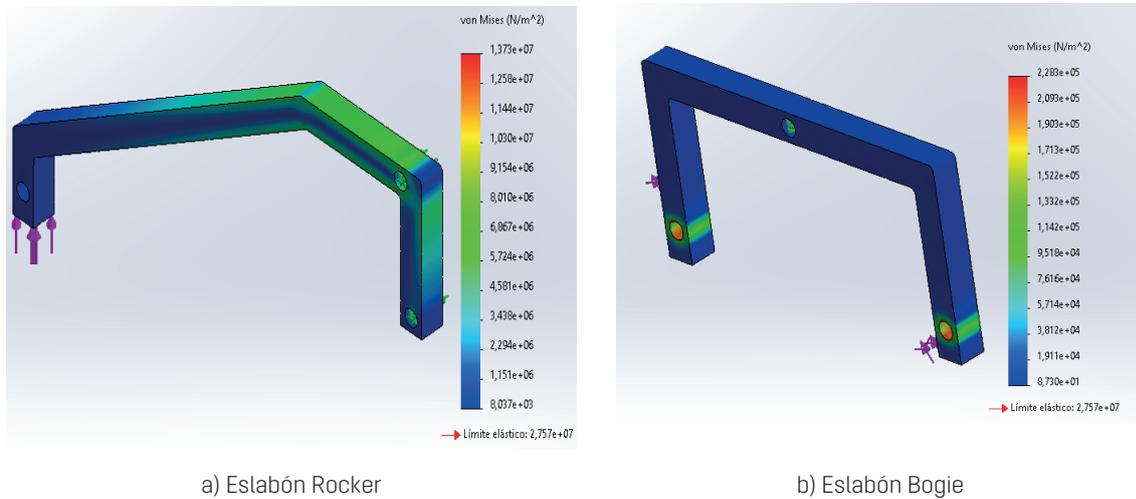
a) Primer prototipo

b) Segundo prototipo

## 2.6 Validación

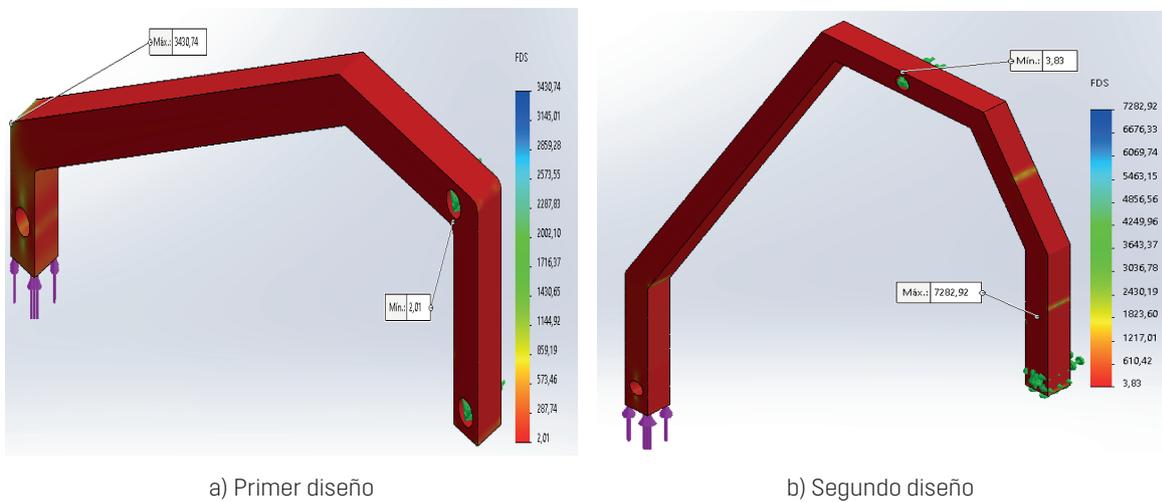
La figura 9 muestra el análisis estático de los eslabones Rocker-Bogie, obteniendo un valor de Von Mises de  $1.373e7 \text{ N/m}^2$  para el eslabón Rocker, lo que permite interpretar que con el paso del tiempo lo primero que podría fallar son las conexiones, mientras que el eslabón Bogie tiene un valor de Von Mises de  $2.283e7 \text{ N/m}^2$ , presentando un desgaste en los centros de conexión con cada uno de los ejes.

**Figura 9.** Análisis estático



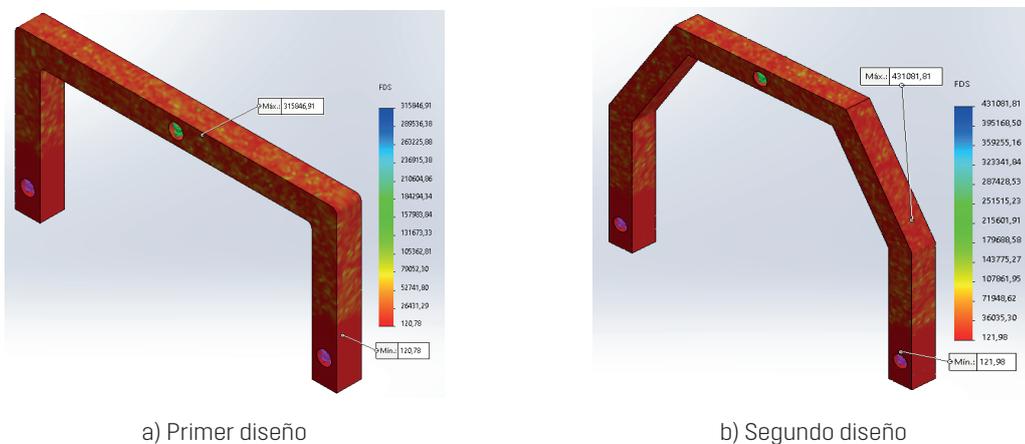
La figura 10 establece el valor máximo y mínimo de los factores de seguridad de los eslabones Rocker. Además, se comprueba que cumplen con el factor de diseño establecido. El valor entregado por el software para el factor de seguridad es de 2.01 para el eslabón Rocker del primer diseño parte (a) y de 3.83 para el segundo diseño parte (b), siendo superior al establecido en los cálculos previamente. Por lo cual, el diseño es adecuado.

**Figura 10.** Factor de seguridad eslabón Rocker



La figura 11 muestra que los valores para el factor de seguridad de los eslabones Bogie también son elevados a los calculados previamente. Por lo cual, el diseño también es adecuado para su implementación.

Figura 11. Factor de seguridad eslabón Bogie



### 3. Resultados

Se realiza un análisis dinámico para el estudio del movimiento analizando parámetros específicos como: velocidad, aceleración y desplazamientos en los ejes X y Y. Determinando, de esta manera, la velocidad y aceleración máxima y mínima alcanzada por el Rover en condiciones normales y al atravesar obstáculos en la pista diseñada. En la figura 12, 13 y 14 observamos el comportamiento del primer prototipo de geometría diseñada. Este consta de eslabones que mantienen el chasis más cerca del suelo.

Figura 12. Distancia entre ejes primer prototipo

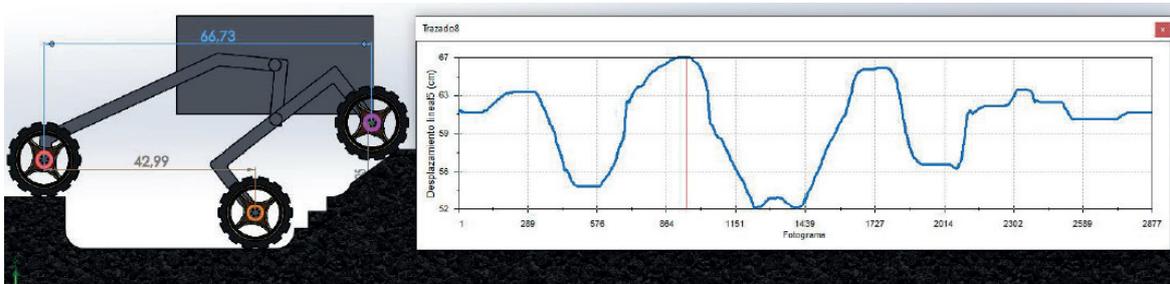
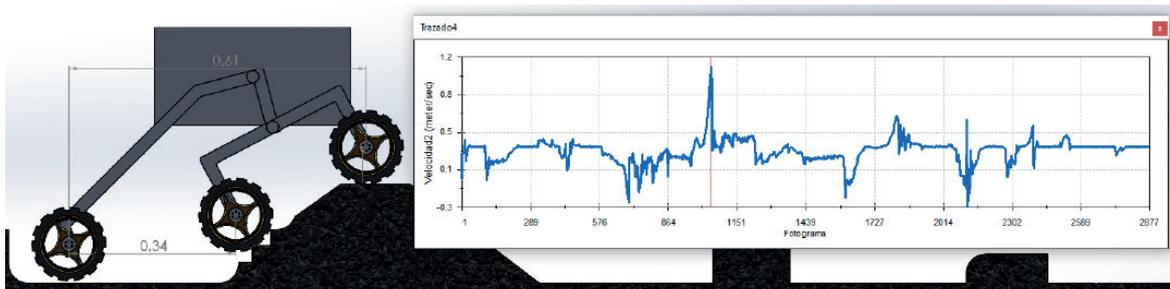
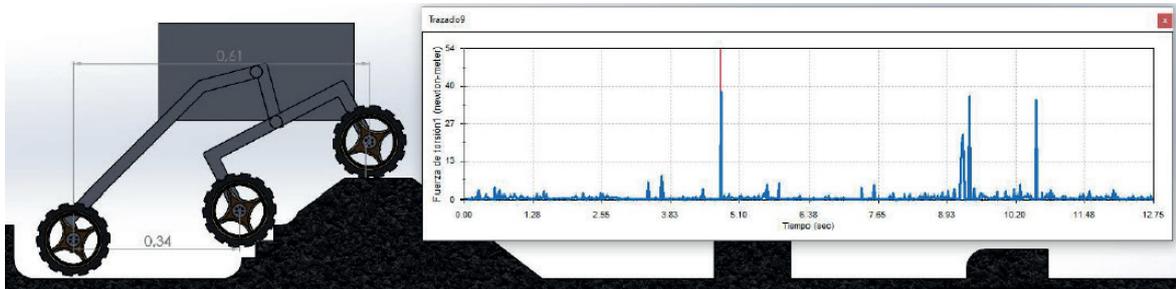


Figura 13. Diagrama de velocidades primer prototipo

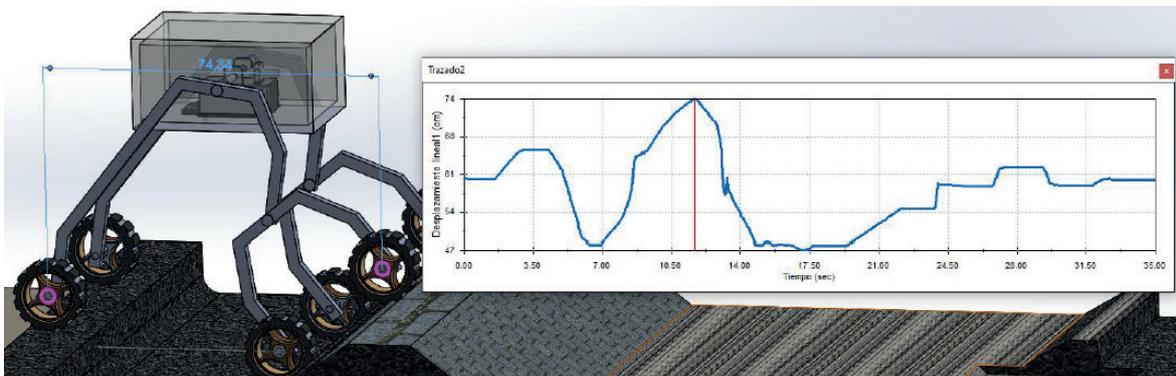


**Figura 14.** Diagrama de la fuerza torsional primer prototipo

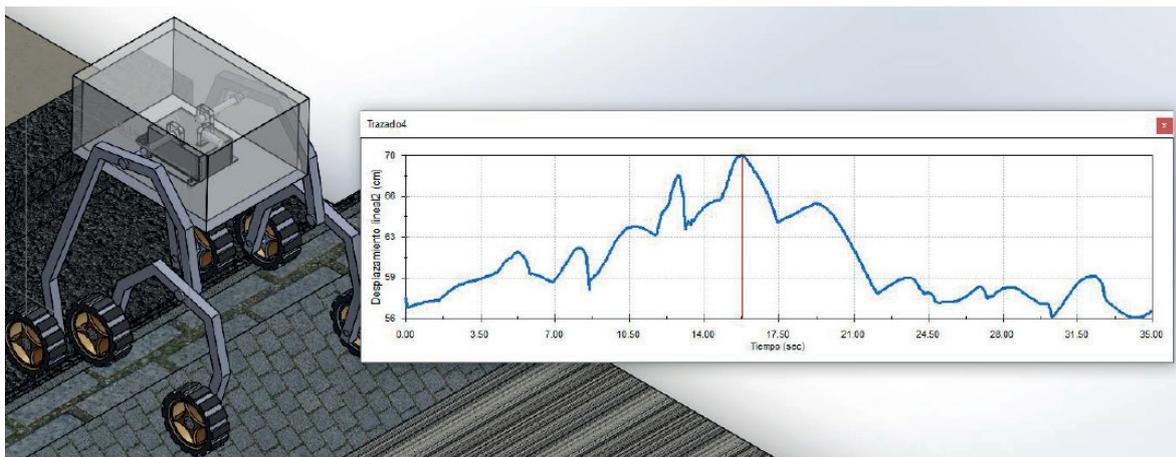


En la figura 15, 16 y 17 observamos el análisis dinámico del segundo prototipo de geometría diseñado.

**Figura 15.** Desplazamiento Rover segundo prototipo



**Figura 16.** Diagrama de altura segundo prototipo



**Figura 17.** Diagrama de velocidades segundo prototipo



#### 4. Discusión

En la tabla 1 observamos una comparativa entre los factores principales analizados en cada uno de los mecanismos de suspensión y los valores previamente calculados. Los datos obtenidos muestran que el prototipo 1, al tener un chasis más cercano al suelo en comparación con otros prototipos que están diseñados con una altura superior centrados en superar escaleras (Kim et al., 2012), mantiene una gran estabilidad y mejor eficiencia al momento de aumentar la velocidad. Algunos estudios están enfocados en el control y seguimiento del prototipo en terrenos blandos, mientras que el presente estudio se caracteriza por diseñar una superficie irregular, observando que el conjunto del prototipo adquiere mayor movilidad y agilidad al sortear obstáculos de diferente nivel (Chen et al., 2021). La altura de los obstáculos que permite cruzar el prototipo está dentro de 1.5 a 2.7 veces la altura de sus ruedas, esta varía de acuerdo al centro de masa del Rover.

**Tabla 1.** Valores comparativos entre prototipos

Nombre	Unidades	Calculados	Prototipo 1	Prototipo 2
Fuerza	N	94	94	94
Altura máxima	cm	26 y 51.96	32.68	70
Longitud máxima	cm	60	66.73	74.34
Velocidad máxima	m/s	0.25	1.2	1.13
Aceleración máxima	m/s <sup>2</sup>	0.02	0.096	0.031
Ángulo máximo	Grados °	30	37.83	39.86

La tabla 2 muestra la comparativa del factor de seguridad de cada uno de los eslabones de los dos prototipos, los valores obtenidos a través de la simulación estática garantizan la seguridad y fiabilidad. El diseño de los eslabones Rocker-Bogie representa una gran fiabilidad y seguridad para cualquier tipo de industria que requiera realizar una tarea específica sobre una superficie irregular. Comparado a otros prototipos, este brinda un factor de seguridad superior

incluso a los cálculos establecidos previamente. Por lo cual, el diseño es óptimo y adecuado (Seralathan et al., 2020).

**Tabla 2.** Análisis F.S.

Nombre	Detalle	F.S Calculado	F.S Simulado
Rocker	Prototipo 1	1.45	2.01
	Prototipo 2		3.83
Bogie	Prototipo 1		12
	Prototipo 2		12.1

## 5. Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se ha optado por el diseño de dos prototipos. Los dos de tipo Rocker-Bogie, pero con un enfoque diferente. El uno tiene el chasis más pegado a la superficie para una mayor estabilidad, mientras que el otro tiene una mayor altura para sortear obstáculos de mayor nivel. Según los resultados obtenidos, el prototipo 1 es el que mejor se desempeña a lo largo de la pista de prueba al tener mayor fuerza de agarre y empuje para superar los obstáculos gracias a la estabilidad que representa tener el chasis pegado a la superficie. La altura de los obstáculos que permite cruzar el prototipo está dentro de 1.5 a 2.7 veces la altura de sus ruedas, no obstante, el diseño está sujeto al área de aplicación, pudiendo variar dicha altura. Se puede aplicar en áreas como la agrícola, minera e industrial en las que se requiera realizar una tarea específica sobre una superficie irregular.

La distancia mínima y máxima alcanzada por el prototipo 1 al atravesar la pista es de 66.73 cm la mayor longitud medida de centro a centro, entre la rueda frontal y la posterior del Rover. La velocidad máxima alcanzada es de 1.1 m/s y la mínima es de -0.3 m/s. La fuerza de tracción facilita que el Rover sea capaz de superar los obstáculos que se encuentran a lo largo de su camino, siendo capaz de adquirir un torque promedio de 36.78 N\*m. Mientras que con el segundo prototipo la distancia mayor adquirida por los ejes de las ruedas frontal y posterior es de 74.34 cm y la menor de 60 cm. La altura máxima alcanzada es de 70cm con respecto a la llanta ubicada en el punto más bajo disponible, conservando su posición de equilibrio adecuado. La velocidad máxima alcanzada en secciones sin obstáculos es de 113 cm/s, este valor representa momentos en los cuales una o algunas de las ruedas tienen un contacto mínimo con el suelo.

Se recomienda utilizar un software programable para establecer el ángulo de giro que deben emplearse en los servos motores Nema, que es controlado con una tarjeta LITEBEE que permite mantener sub rutinas. Así mismo, el tablero se integra con PX4FMU + PX4IO. Pixhawk está con la nueva tecnología de chips y sensores de 32 bits que complementan el funcionamiento adecuado de la implementación de sensores junto al mecanismo desarrollado, evitando que este pueda chocar o volcarse en terrenos que contengan gran cantidad de imperfecciones.

Es importante considerar la aplicación del prototipo, de ello dependerá el enfoque del diseño cinemático basado en grados de libertad. Algunas superficies requerirán que se aumente el número de ruedas para adaptarse a la superficie. Además, se recomienda optar por un método de control simultáneo de seguimiento para rastrear la trayectoria deseada y mantener pequeñas fuerzas internas, utilizando la información de movimiento en paralelo con la información de fuerza.

Para este estudio, los eslabones Rocker-Bogie junto con el chasis son de material de aluminio 1060, las llantas y neumáticos material ABS, parámetros necesarios para la validación estática. Para futuras líneas de investigación se recomienda utilizar distintos tipos de material que aligeren la estructura y tengan mayor agarre a la superficie, además de agregar variadores de velocidad capaces de incrementar o reducir rápidamente según la demanda, con el fin de optimizar el traslado del Rover. También se puede incurrir en acondicionar sensores ultrasónicos de precisión para un seguimiento controlado de la trayectoria deseada mediante la implementación de un sistema IA.

## Referencias

- Bogue, R. (2012). Robots for Space Exploration. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(4): 323-328. doi:10.1108/01439911211227872
- Cabrera, J.; Jurado, F., y Vera, D. (2021). Simulación de un deshidratador híbrido indirecto activo mediante el software ANSYS. *Enfoque UTE*, 12(4): 29-44. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.771>
- Chen, C., et al. (2021). Simultaneous Control of Trajectory Tracking and Coordinated Allocation of Rocker-Bogie Planetary Rovers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151: 107312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107312>
- Chinchkar, D., et al. (2017). Design of Rocker Bogie Mechanism. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(1): 46-50.
- Conte, R. (2013). Robot Espaciales. Recuperado de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articulo.php?interior=39>
- Eisen, H. J., et al. (1998). Sojourner Mars Rover Thermal Performance. *SAE Transactions*, 107: 697-707. <http://www.jstor.org/stable/44735797>
- Elishakoff, I. (2017). Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling. *Mechanical Systems and Signal Processing* (151): 107312
- Gonzalez, R., y Iagnemma, K. (2017). Slippage Estimation and Compensation for Planetary Exploration Rovers. State of the Art and Future Challenges. *Journal of Field Robotics*, 35(4): 564-577. doi:10.1002/rob.21761
- Gul, F., et al. (2021). Multi-Robot Space Exploration: An Augmented Arithmetic Approach. *IEEE Access*, (9): 107738-107750. doi:10.1109/ACCESS.2021.3101210.
- Hu, J., et al. (2020). Voronoi-Based Multi-Robot Autonomous Exploration in Unknown Environments via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 12 (69): 14413-14423. doi:10.1109/TVT.2020.3034800
- Hu, Y., et al. (2019). Design and Validation of a Self-Driven Joint Model for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. *Applied Sciences*, 9(15). <https://doi.org/10.3390/app9153151>
- Karras, J. T., et al. (2017). Pop-up Mars Rover with Textile-enhanced Rigid-flex PCB body. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: 5459-5466. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989642>
- Kim, D., et al. (2012). Optimal Design and Kinetic Analysis of a Stair-climbing Mobile Robot with Rocker-Bogie Mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 50: 90-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.013>
- Kornfeld, R. et al. (2014). Verification and Validation of the Mars Science Laboratory/Curiosity Rover Entry, Descent, and Landing System. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 51(4): 1251-1269. <https://doi.org/10.2514/1.A32680>
- Meghdari, A., et al. (2005). A Novel Approach for Optimal Design of a Rover Mechanism. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 44(4): 291-312. <https://doi.org/10.1007/s10846-005-9013-5>.

- Misha, S., et al. (2020). Simulation CFD and Experimental Investigation of PVT Water System Under Natural Malaysian Weather Conditions. *Energy Re-ports*, 6: 28-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.162>
- Musto, J. (2010). The Safety Factor: Case Studies in Engineering Judgment. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 38(4): 286-296. <https://doi.org/10.7227/IJMEE.38.4.2>
- Sanguino, T. (2017). 50 Years of Rovers for Planetary Exploration: A Retrospective Review for Future Directions. *Robotics and Autonomous Systems*, 94: 172-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.020>
- Seralathan, S., et al. (2020). Static Structural Analysis of Wheel Chair Using a Rocker Bogie Mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 33: 3583-3590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.658>
- Smith, B., Y Saaj, C. (2009). Biologically Inspired Nano-rovers: Innovative and Low-Cost Technologies Using Shape Memory Alloys. In *Proceedings of 60th International Astronautical Congress*.
- Tashtoush, T. et al. (2020). Reverse-Twister Swarm Search Algorithm Design: NASA Swarmathon Competition. *International Journal of Research Studies in Computer Science and Engineering*, 1 (7): 29-36. <https://doi.org/10.20431/2349-4859.0701004>
- Toupet, O., et al. (2018). Traction Control Design and Integration Onboard the Mars Science Laboratory Curiosity Rover. *IEEE Aerospace Conference*: 1-20. <https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396761>
- Tunstel, E. (2007). Prototype Rover Field Testing and Planetary Surface Operations. *Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, 196-203. <https://doi.org/10.1145/1660877.1660905>
- Volpe, R., et al. (1996). The Rocky 7 Mars rover prototype. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*, 3: 1558-1564. <https://doi.org/10.1109/IROS.1996.569020>
- Xu, Y., y Wang, Z. (2021). Visual Sensing Technologies in Robotic Welding: Recent Research Developments and Future Interests. *Sensors and Actuators. A Physical*, 320: 112551. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112551>
- Yang, J.; Dong, M., y Ye, J. (2017). A Literature Review of the Rocker-Bogie Suspension for the Planetary Rover. *AISR*, 150: 137-142
- Zheng, J., et al. (2018). Design and Terramechanics Analysis of a Mars Rover Utilizing Active Suspension. *Mechanism and Machine Theory*, 128: 125-149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.002>