



Enero - Junio 2025

Volumen 15

Número 1

Páginas 1 - 54

e-ISSN: 1390-5902



Universidad  
Nacional  
de Loja

[revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz](http://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz)



**Enero - Junio 2025**

Volumen 15

Número 1

Páginas 1 - 54

e-ISSN: 1390-5902



Universidad  
Nacional  
de Loja



## AUTORIDADES

**Nikolay Aguirre, Ph.D.**  
Rector

**Elvia Zhapa, Ph.D.**  
Vicerrectora

## COMITÉ EDITORIAL

**Paúl Eguiguren, Ph.D.**  
**Director General**  
paul.eguiguren@unl.edu.ec

**Zhofre Aguirre, Ph.D.**  
**Editor Ejecutivo**  
zhofre.aguirre@unl.edu.ec

**Tatiana Ojeda Luna, Ph.D.**  
**Editora Ejecutiva**  
tatiana.oluna@unl.edu.ec

**Marina Mazón Morales, Ph.D.**  
**Editora en Ciencias Forestales, Biodiversidad y Medio Ambiente**  
marina.mazon@unl.edu.ec

**Rodrigo Abad Guamán, Ph.D.**  
**Editor en Ciencias Agropecuarias**  
rodrigo.abad@unl.edu.ec

**Amable Bermeo, M.Sc.**  
**Editor en Ciencias de la Salud y Biotecnología**  
bermeoa@unl.edu.ec

**Oscar Cumbicus Pineda, Ph.D.**  
**Editor en Ciencias Exactas e Ingenierías**  
oscar.cumbicus@unl.edu.ec

**Pablo Lozano, Ph.D.**  
Universidad Estatal Amazónica (Ecuador)

**Selene Báez, Ph.D.**  
CONDESAN (Ecuador)

**Ximena Palomeque, Ph.D.**  
Universidad de Cuenca (Ecuador)

**Dennis Denis, Ph.D.**  
Universidad de La Habana (Cuba)

**John Lattke, Ph.D.**  
Universidade Federal do Paraná (Brasil)

**Jerónimo Torres, Ph.D.**  
Universidad de Córdoba (España)

**Dan Cogalniceanu, Ph.D.**  
Universidad de Bucarest (Rumanía)

**Pablo Cuenca, Ph.D.**  
IKIAM (Ecuador)

**Gretel Geada López, Ph.D.**  
Universidad del Pinar del Río (Cuba)

**Luis Ordoñez, M.Sc.**  
Corporación ECOPAR (Ecuador)

**Marlon Cobos, M.Sc.**  
Universidad de Kansas (Estados Unidos)

**Bolier Tores, Ph.D.**  
Universidad Estatal Amazónica (Ecuador)

**Fernando Gordillo, M.Sc.**  
Instituto Thünen (Alemania)

**Max Gonzáles, M.Sc.**  
Sociedad Ecuatoriana de Salud Pública (Ecuador)

**Diego Moya, M.Sc.**  
Grantham Institute SSCP-DTP (Reino Unido)

**Mario Heredia, Ph.D.**  
Humboldt Universität zu Berlin (Alemania)

**Aitor Soroa Echave, Ph.D.**  
Universidad del País Vasco (España)

**Itziar González-Dios, Ph.D.**  
Universidad del País Vasco (España)

**Lisset A. Neyra-Romero, M. Sc.**  
Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador)

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Nikolay Aguirre, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Loja (Ecuador)

**Juan Maita, M.Sc.**  
Universidad Nacional de Loja (Ecuador)

**Natalia Samaniego, M.Sc.**  
Universidad Nacional de Loja (Ecuador)

**Aura Paucar-Cabrera, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Loja (Ecuador)

**Helena España, Ph.D.**  
Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

**James Aronson, Ph.D.**  
Centro de Ecología Evolutiva (Francia)

La Revista Científica **CEDAMAZ**, es una revista multidisciplinaria, con revisión por pares (peer-review process) y de acceso abierto (open access license), dirigida a profesores, estudiantes, profesionistas e investigadores. Tiene como objetivo fomentar la comunicación científica y la colaboración entre personas y organizaciones involucradas en investigación y el desarrollo a nivel local, regional e internacional. La revista fomenta la transferencia del conocimiento científico de manera gratuita tanto para las y los autores, como para las y los lectores, a través de la divulgación de resultados de trabajos científicos originales, en un amplio rango de disciplinas que incluyen las siguientes áreas de investigación:

- Ciencias forestales, biodiversidad y medio ambiente.
- Ciencias veterinarias y agropecuarias.
- Ciencias de la salud y biotecnología.
- Ciencias exactas e ingenierías.

**CEDAMAZ** presenta información actualizada y pertinente a nivel regional e internacional destacando temáticas en experiencias forestales, biodiversidad, medio ambiente, veterinarias, agropecuarias, salud humana, biotecnología, ciencias exactas e ingenierías.

Los trabajos o revisiones de literatura presentadas a **CEDAMAZ** no deben haberse publicado previamente en libros de memorias de un congreso o revistas

científicas arbitradas. Las presentaciones previas en un evento científico pueden publicarse en la revista **CEDAMAZ**, pero también estarán sujetos a un proceso de revisión por pares.

**CEDAMAZ** se publica en español o en inglés, desde el año 2019 dos veces al año, en un solo volumen. Las opiniones expresadas en documentos publicados en **CEDAMAZ** representan la opinión de los autores y no reflejan necesariamente la política oficial de **CEDAMAZ** o de sus Editores.

#### **Publicada por**

Univeridad Nacional de Loja

#### **Oficina Editorial**

Universidad Nacional de Loja. Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, 110150 Loja - Ecuador. <https://unl.edu.ec>

#### **Diseño de logotipo**

Lcda. Sara Jaramillo Carrión

#### **Edición**

Ph.D. Oscar M. Cumbicus-Pineda

Ph.D. Paúl Eguiguren

---

#### **CEDAMAZ**

E-ISSN: 1390-5902

PBX: (593) 07 - 2545100

<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz>

Esta obra esta sujeta a la licencia internacional CC BY-NC-ND 4.0 

# ÍNDICE

## ARTÍCULOS

### ***CIENCIAS FORESTALES, BIODIVERSIDAD Y MEDIO AMBIENTE***

- Especies forestales potenciales como componentes agroforestales en fincas de *Coffea arabica* L., en dos pisos altitudinales del cantón Palanda** 1  
Luis Muñoz-Chamba y Servio Saritama
- Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la ciudad de Loja, Ecuador** 8  
Cecilia Deicy Lozano, María Fernanda Macas, Nohemi Jumbo,  
Paulina Fernández y Darwin Pucha

### ***CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS***

- Evaluación espacial multicriterio para la localización óptima de plantas de bioenergía en Ecuador usando SIG** 19  
María Eliza Vega-Iñiguez, Yulissa del Cisne Marín-Apolo y Danny Ochoa-Correa
- Optimización de diseño de mallas a tierra a través del análisis de la resistividad del suelo: Una investigación integral para el sector de Sangolquí** 27  
Flavio Barbosa, Santiago Pérez y Kevin Avilés
- Estudio químico-mineralógico de una antigua escombrera del área minera de Barruecopardo (Salamanca): Implicaciones medioambientales** 36  
Oscar Estrella, Ascensión Murciego Murciego y Esther Álvarez Ayuzo
- Optimización de la Captura y Procesamiento de Imágenes SWIR para la Detección de Defectos en Paneles Fotovoltaicos** 48  
Franklin Gómez-López, Danny Ochoa-Correa e Isabel Cabrera-Carrera

# INDEX

## ARTICLES

### *FOREST, BIODIVERSITY AND ENVIRONMENTAL SCIENCES*

Potential forest species as agroforestry components on  
*Coffea arabica* L., farms at two altitudinal levels in the Palanda canton  
Luis Muñoz-Chamba and Servio Saritama

1

Ecosystem services of urban trees in the city of Loja, Ecuador  
Cecilia Deicy Lozano, María Fernanda Macas, Nohemi Jumbo,  
Paulina Fernández and Darwin Pucha

8

### *EXACT SCIENCES AND ENGINEERING*

Spatial Multi-Criteria Assessment for Optimal Biomass Power  
Plant Siting in Ecuador Using GIS  
María Eliza Vega-Iñiguez, Yulissa del Cisne Marín-Apolo and Danny Ochoa-Correa

19

Optimization of the design for ground grid systems through the analysis  
of soil resistivity: A comprehensive investigation for the sector  
of Sangolqui  
Flavio Barbosa, Santiago Pérez and Kevin Avilés

27

Chemical-mineralogical study of an old dump in the mining area  
of Barruecopardo (Salamanca): Environmental implications  
Oscar Estrella, Ascensión Murciego Murciego and Esther Álvarez Ayuzo

36

Optimization of SWIR Image Capture and Processing for  
Defect Detection in Photovoltaic Panels  
Franklin Gómez-López, Danny Ochoa-Correa and Isabel Cabrera-Carrera

48

# Especies forestales potenciales como componentes agroforestales en fincas de *Coffea arabica* L., en dos pisos altitudinales del cantón Palanda

## *Potential forest species as agroforestry components on Coffea arabica L., farms at two altitudinal levels in the Palanda canton*

Luis Muñoz-Chamba<sup>1,\*</sup> and Servio Saritama<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería Forestal, Grupo de Investigación en Biodiversidad, Universidad Nacional de Loja, Ecuador

<sup>2</sup> Maestría en Restauración de Paisajes Tropicales, Universidad Nacional de Loja

\* Autor para correspondencia: luis.munoz@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 09/11/2024

Fecha de aceptación del manuscrito: 07/02/2025

Fecha de publicación: 30/06/2025

**Resumen**—El cultivo de *Coffea arabica* en el cantón Palanda, provincia de Zamora Chinchipe, es ejecutado en fincas cafetaleras en asociación con especies arbóreas. Este estudio evaluó especies forestales como potenciales componentes agroforestales en asociación con *Coffea arabica*, en dos pisos altitudinales del cantón Palanda. Se seleccionaron ocho fincas de aproximadamente una hectárea, cuatro en el piso altitudinal bajo y cuatro en el piso alto. Se midieron todos los individuos con  $DAP \geq 5$  cm. Por especie se identificaron los beneficios biológicos y socioeconómicos mediante el coeficiente de importancia de las especies; y posterior se evaluó y agrupo especies en cuatro categorías de adecuación. La composición florística asociada al cultivo de *C. arabica*, fue de 26 especies y 337 individuos en el piso alto; y, 30 especies y 231 individuos para el piso bajo. La diversidad fue media y no existió diferencias entre la composición florística entre pisos. Se determinaron 15 especies con mayor beneficio ecológico y socioeconómico, 10 para el piso alto, dos para el bajo y tres fueron compartidas entre pisos. El 22 % de las especies fueron muy adecuadas y un 32 % adecuadas para ser potenciales componentes de sistemas agroforestales en asociación con *C. arabica*. La composición y diversidad registrada en las fincas cafetaleras resultó fundamental para la estabilidad ecológica, resiliencia y sostenibilidad de los sistemas agroforestales. Destacan las especies frutales como las de mayor importancia ecológica, y las frutales y maderables como potenciales componentes agroforestales, garantizando una variedad de beneficios ecológicos y socioeconómicos para los sistemas agroforestales.

**Palabras clave**—Agroecología, Pisos altitudinales, Restauración de paisaje, Servicios ecosistémicos.

**Abstract**—The cultivation of *Coffea arabica* in the Palanda canton, Zamora Chinchipe province, is practiced on several coffee farms in association with various tree species. This study evaluated tree species as potential agroforestry components associated with *Coffea arabica* at two altitudinal levels in the Palanda canton. Eight farms were selected, four at lower altitudes and four at higher altitudes. All individuals with a diameter at breast height (DBH)  $\geq 5$  cm were measured. For each species, biological and socioeconomic benefits were identified using the importance coefficient, after which species were evaluated and grouped into four suitability categories. The floristic composition associated with *C. arabica* cultivation comprised 26 species and 337 individuals at higher altitudes, and, 30 species and 231 individuals at lower altitudes. The diversity was moderate, with no significant differences in floristic composition between altitudinal levels. Fifteen species with the greatest ecological and socioeconomic benefits were identified: 10 at higher altitudes, two at lower altitudes, and three common to both levels. Twenty-two percent of the species were deemed highly suitable, and 32 % were considered appropriate as a potential components of agroforestry systems associated with *C. arabica*. The recorded composition and diversity on coffee farms were essential for the ecological stability, resilience and, sustainability of agroforestry systems. Fruit species emerged as the most ecologically valuable, while fruit and timber species were identified as potential agroforestry components, guaranteeing a variety of ecological and socioeconomic benefits for agroforestry systems.

**Keywords**—Agroforestry, Altitudinal levels, Ecosystem services, Landscape restoration.

## INTRODUCCIÓN

La agroforestería, aplicada en fincas cafetaleras ubicadas en diferentes pisos altitudinales, se presenta como como una estrategia para el aprovechamiento sostenible de la

tierra en paisajes con presión agrícola. Al integrar especies forestales potenciales con cultivos de *Coffea arabica* L. dentro de una misma unidad de producción (Ramos-Veintimilla et al., 2005; Nair, 2011), se busca mejorar la productividad de los sistemas agrícolas, manteniendo como principios fun-



cios de la APECAP, de los cuales se tomó una muestra de 31 productores. La selección de la muestra correspondió a criterios cualitativos que APECAP utiliza en diversos procesos de evaluación y control, como experiencia en temas agroforestales y disponibilidad para participar en el estudio.

La encuesta semiestructurada constó de tres secciones que fueron: 1) información sociodemográfica, 2) uso, demanda e importancia de las especies forestales; y, 3) información económica y especies forestales de interés por los productores. Con la información levantada en campo, se estimó el coeficiente de importancia de las especies (CIE), que permite identificar sus beneficios biológicos y socioeconómicos. El CIE contempló tres componentes: nivel de utilización (NU), la importancia biofísica (IB) y la demanda de comercialización de la especie (DC), reflejando así el potencial funcional y económico de cada especie (Castillo-Angulo et al., 2021). La fórmula para su cálculo fue:

$$CIE = \frac{3NU + 2IB + DC}{6} \quad (1)$$

El nivel de utilización (NU) se asignó en función de la importancia de cada especie dentro de las fincas en asociación con *C. arabica*, considerando tres categorías: muy alta (tres o más usos), alta (2 usos), y baja (un solo uso). La importancia biofísica (IB) se evaluó según la frecuencia de la especie, y se clasificó en cuatro categorías: alta frecuencia 3 (70 - 100 %), media frecuencia 2 (31 - 69 %), baja frecuencia 1 (1 - 30 %) y muy baja frecuencia - 0 (0,1 - 0,9 %). La demanda de comercialización (DC) se determinó a partir de la percepción de los productores, enfocándose exclusivamente en el interés comercial por especies maderables. Se asignaron valores de 3 a las especies consideradas altamente demandadas, 2 para las medianamente demandadas, 1 para las de poca demanda, y cero para especies sin demanda en este tipo de uso.

### Especies forestales potenciales para sistemas agroforestales

La selección de especies forestales potenciales para formar parte de sistemas agroforestales en asociación con *C. arabica*, se hizo en función de una evaluación de criterios que fueron seleccionados de acuerdo a información secundaria y evaluados mediante una escala de 1 a 4 (Tabla 1) (Romero Mejía, 2005). Las especies evaluadas fueron priorizadas entre las de mayor CIE y de interés para los propietarios de las fincas.

Posteriormente, las especies forestales evaluadas fueron agrupadas en cuatro categorías presentes en la Tabla 2.

### Análisis de la información

La información recolectada fue analizada mediante estadística descriptiva (totales y promedios). Para comparar las variables de las especies arbóreas entre los dos pisos altitudinales, se empleó la Prueba t-Student ( $\alpha=0,05$ ), con especial énfasis en la diversidad. De igual manera, se utilizó un análisis multidimensional no métrico (NMDS) y la prueba no paramétrica ANOSIM para evaluar la similitud de las especies forestales entre los dos pisos altitudinales.

## RESULTADOS

### Composición y diversidad arbórea asociada a fincas de *Coffea arabica* L.

La composición florística de especies con DAP  $\geq 5$  cm asociadas al cultivo de *C. arabica* en ocho fincas del cantón Palanda estuvo determinada por un total de 568 individuos y 42 especies. Para el piso altitudinal alto, se registraron 26 especies y 337 individuos; y, para el piso bajo fueron 30 especies y 231 individuos. Entre las especies con mayor abundancia para el piso alto sobresalieron *Erythrina edulis*, *Inga edulis*, *Erythrina ulei*, *Musa x paradisiaca* y *Lafoensia punicifolia*; mientras que, para el piso bajo fueron *Musa x paradisiaca*, *Cordia alliodora*, *Bactris gasipaes*, *Inga spectabilis*, y *Ficus involuta*.

En cuanto a la diversidad, el piso altitudinal bajo presentó un mayor número de individuos, especies y familias. En ambos pisos altitudinales se registraron árboles, arbustos y arbustos roseta; y, las palmas estuvieron presentes solo en el piso bajo. Los índices de diversidad Shannon y Simpson determinaron una diversidad media y alta, respectivamente, en ambos pisos altitudinales (Tabla 3). Sin embargo, estos valores no mostraron diferencias significativas según la prueba t de Student (Shannon  $p=0,74 > 0,05$ ; Simpson  $p=0,74 > 0,05$ ).

En relación con la similitud de las especies con DAP  $\geq 5$  cm entre los dos pisos altitudinales, el análisis escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) y la prueba no paramétrica ANOSIM, determinaron que no existen diferencias significativas en la composición de especies vegetales entre fincas (ANOSIM,  $R=0,1042$ ,  $p=0,3387$ ) y entre pisos altitudinales (ANOSIM,  $R=0,1146$ ,  $p=0,2371$ ), es decir, no existe una marcada disimilitud.

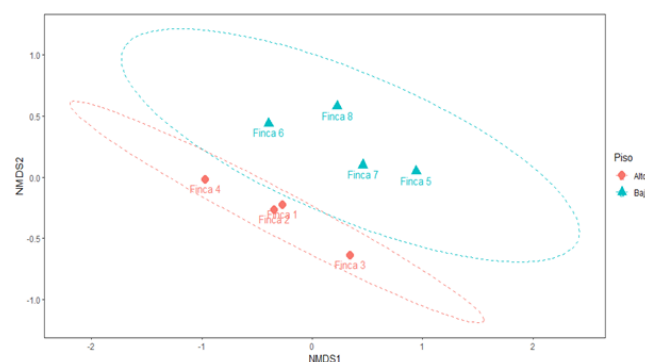


Fig. 2: Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) entre fincas y pisos altitudinales de la vegetación asociada asociadas con *C. arabica*

### Beneficios biológicos y socioeconómicos de las especies forestales

Se determinaron 15 especies con mayor beneficio ecológico y socioeconómico (CIE) para los productores de la APECAP en las fincas en asociación con *C. arabica*. De estas, 10 especies correspondieron al piso altitudinal alto, dos para el piso bajo y tres fueron compartidas para los dos pisos (Tabla 4).

**Tabla 1:** Criterios para evaluación de las especies forestales potenciales en un SAF y la escala de evaluación.

| Criterios                                                                  | Escala de valoración |           |      |          |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------|------|----------|
|                                                                            | 1                    | 2         | 3    | 4        |
| Uso para madera                                                            | No útil              | Poco útil | Útil | Muy útil |
| Usos diferentes a la madera (frutos, flores, hojas, resinas, entre otros). | No útil              | Poco útil | Útil | Muy útil |
| Conservación del suelo                                                     | Muy baja             | Baja      | Alta | Muy alta |
| Interés del propietario                                                    | Muy baja             | Baja      | Alta | Muy alta |
| Regulación de sombra y microclima                                          | Muy baja             | Baja      | Alta | Muy alta |
| Aumento de la biodiversidad                                                | Muy baja             | Baja      | Alta | Muy alta |
| Importancia económica de las especies (CIE)                                | Muy baja             | Baja      | Alta | Muy alta |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2:** Interpretación de los valores obtenidos en la evaluación de los criterios para la selección de especies forestales para el SAF.

| Valores | Interpretación |
|---------|----------------|
| 1–7     | No adecuadas   |
| 8–14    | Poco adecuadas |
| 15–21   | Adecuadas      |
| 22–28   | Muy adecuadas  |

**Tabla 3:** Diversidad específica para las fincas asociadas con *C. arabica* en dos pisos altitudinales en el cantón Palanda.

| Parámetro                         | Piso altitudinal |      |
|-----------------------------------|------------------|------|
|                                   | Alto             | Bajo |
| Número de especies                | 26               | 30   |
| Número de individuos              | 337              | 231  |
| Número de familias                | 16               | 20   |
| Número de especies arbóreas       | 17               | 25   |
| Número de especies arbustivas     | 7                | 2    |
| Número de especies arbusto roseta | 2                | 2    |
| Número de especies de palma       | 0                | 1    |
| Índice de Shannon                 | 2,54             | 2,50 |
| Índice de Simpson                 | 0,88             | 0,87 |

Fuente: Elaboración propia

### Especies potenciales para asociación con *C. arabica*

Se evaluaron un total 45 especies, entre las que se encontraron en las fincas productoras de café con las especies de interés por parte de los propietarios. El 22,22 % de las especies se agruparon como muy adecuadas, el 31,48 % como adecuadas, 27,78 % medianamente adecuadas y el 18,52 % fueron inadecuadas (Tabla 5).

## DISCUSIÓN

### Composición y diversidad arbórea asociada a fincas de *Coffea arabica* L.

La composición florística de las especies con DAP  $\geq 5$  cm asociadas al cultivo de *C. arabica* presentó variabilidad entre los pisos altitudinales alto y bajo. Se registraron especies propias de cada piso, como *Inga edulis* y *Erythrina edulis* en el piso alto, mientras que *Bactris gasipaes* predominó en

el piso bajo. Al comparar estos resultados con otros estudios que consideran gradientes altitudinales, se identificaron diferencias en la riqueza específica, lo que sugiere que la composición arbórea puede variar significativamente a lo largo de gradientes altitudinales. De acuerdo con Fischer et al. (2011), estas diferencias podrían estar influenciadas por las diversas configuraciones espaciales o tipos de usos de suelo ocasionadas por la intervención antrópica y su efecto en la adaptación de las especies.

La riqueza específica fue mayor en el piso altitudinal bajo; sin embargo, los índices de diversidad de Simpson y Shannon no presentaron diferencias significativas. Para el presente estudio se podría asumir un importante número de especies arbóreas establecidas en las fincas con cultivos de *C. arabica*, manteniendo así altos niveles de biodiversidad, lo que según Nair (2011), mejora la conectividad del paisaje. Estos resultados fueron un poco similares a los reportados por Muñoz et al. (2013) en el departamento de Nariño, Colombia, donde se registraron 40 especies con potencial agroforestal; y, 43 especies arbóreas en asociación con *C. arabica* reportados por Zapata Arango (2019) en Cundinamarca, Colombia.

### Beneficios biológicos y socioeconómicos de las especies forestales

El coeficiente de importancia para las especies (CIE) varió dependiendo del piso altitudinal donde se encontraron las especies. Algunas de estas tuvieron un alto valor ecológico y socioeconómico para ambos pisos altitudinales; y, podría mencionarse que son claves y pueden aprovecharse para mejorar la productividad del café, conservar la biodiversidad y los ingresos económicos de los productores APECAP (Ponce Vaca, et al., 2018). Ejemplos de especies con valores CIE diferentes por cada piso altitudinal, fueron *Citrus sinensis* y *Cordia alliodora*, situación que pudiera explicarse por las condiciones ecológicas, las condiciones específicas ambientales y las necesidades antrópicas de cada piso, pues las especies que se desarrollan a altitudes bajas podrían tener acceso a suelos más ricos y climas más cálidos, favoreciendo su comercialización y utilización. Por el contrario, a altitudes más altas las especies deben adaptarse a condiciones más frías y suelos menos fértiles, convirtiéndolas como más valiosas desde el punto de vista de su importancia biofísica (Escobar et al., 2005; Fischer et al., 2011; Tesfay et al., 2022). Estas

**Tabla 4:** Especies forestales con mayor CIE en las fincas asociadas con *C. arabica* en dos pisos altitudinales, en el cantón Palanda.

| Especies                                  | Piso altitudinal | IB | NU | DC | CIE |
|-------------------------------------------|------------------|----|----|----|-----|
| <i>Inga edulis</i> Mart.                  | Alto             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Inga spectabilis</i> (Vahl) Willd.     | Alto             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Citrus limetta</i> Risso               | Alto             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Citrus reticulata</i> Blanco           | Alto y bajo      | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck        | Alto y bajo      | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Citrus aurantium</i> Llave & Lexarza   | Alto             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Erythrina ulei</i> Harms               | Alto             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Bactris gasipaes</i> Kunth             | Bajo             | 3  | 3  | 3  | 3   |
| <i>Annona muricata</i> L.                 | Alto             | 3  | 3  | 2  | 2,8 |
| <i>Eugenia jambos</i> L.                  | Alto             | 3  | 3  | 2  | 2,8 |
| <i>Pouteria caimito</i> Radlk.            | Alto y bajo      | 3  | 3  | 2  | 2,8 |
| <i>Matisia cordata</i> Bonpl.             | Bajo             | 3  | 3  | 2  | 2,8 |
| <i>Erythrina edulis</i> Triana ex Micheli | Alto             | 3  | 3  | 1  | 2,7 |
| <i>Psidium guajava</i> L.                 | Alto             | 3  | 3  | 1  | 2,7 |
| <i>Acnistus arborescens</i> L.            | Alto             | 3  | 3  | 1  | 2,7 |

**Nota:** IB: importancia biofísica, NU: nivel de utilización, DC: demanda de comercialización, CIE: coeficiente de importancia económica de las especies.

**Tabla 5:** Especies forestales categorizadas de acuerdo con su potencial para ser utilizadas en sistemas de producción con *C. arabica*, para el cantón Palanda.

| Categorías             | Especies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Nro. especies |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Inadecuadas            | <i>Dendropanax</i> sp., <i>Vochysia guianensis</i> Aubl., <i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith, <i>Centrolobium ochroxylum</i> Rose ex Rudd, <i>Guazuma angustifolia</i> Kunth, <i>Juglans neotropica</i> Diels, <i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart., <i>Ficus involuta</i> (Liebm.) Miq., <i>Sapium stylare</i> Müll. Arg., <i>Platymiscium pinnatum</i> (Jacq.) Dugand                                                                                                                                                                                                                     | 10            |
| Medianamente adecuadas | <i>Persea americana</i> Mill., <i>Persea caerulea</i> (Ruiz & Pav.) Mez, <i>Lafoensia puniceifolia</i> DC., <i>Eucalyptus globulus</i> Labill., <i>Psidium guajava</i> L., <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb., <i>Citrus aurantium</i> Llave & Lexarza, <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb., <i>Bixa orellana</i> L., <i>Guazuma</i> sp., <i>Persea caerulea</i> (Ruiz & Pav.) Mez, <i>Tectona grandis</i> L. f., <i>Eucalyptus globulus</i> Labill., <i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav., <i>Minquartia guianensis</i> Aubl.                                                   | 15            |
| Adecuadas              | <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb., <i>Podocarpus oleifolius</i> D. Don, <i>Pouteria caimito</i> Radlk., <i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck, <i>Citrus limon</i> (L.) Burm. f., <i>Citrus reticulata</i> Blanco, <i>Citrus limetta</i> Risso, <i>Carica papaya</i> L., <i>Annona muricata</i> L., <i>Annona cherimola</i> Mill., <i>Bactris gasipaes</i> Kunth, <i>Matisia cordata</i> Bonpl., <i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart., <i>Eucalyptus globulus</i> Labill., <i>Pouteria caimito</i> (Miguel) Standl., <i>Eugenia jambos</i> L., <i>Veronanthura patens</i> (Kunth) H. Rob. | 17            |
| Muy adecuadas          | <i>Erythrina ulei</i> Harms, <i>Inga spectabilis</i> (Vahl) Willd., <i>Erythrina edulis</i> Triana ex Micheli, <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Musa x paradisiaca</i> L., <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken, <i>Acacia mangium</i> , <i>Cecropia</i> sp., <i>Musa sapientum</i> L., <i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F. Blake, <i>Acnistus arborescens</i> L.                                                                                                                                                                                                                            | 11            |

**Fuente:** Elaboración propia

condiciones también influyen en la calidad del café, pues la maduración más lenta del fruto en altitudes altas exige especies forestales que provean sombra adecuada y regulen la temperatura del microclima, contribuyendo indirectamente a mejorar el perfil sensorial del grano.

En el piso alto, las especies con mayores valores CIE fueron maderables y frutales, destacando los géneros *Citrus*, *Inga* y *Erythrina* con una importancia no solo maderable y frutal, sino también en su rol dentro de sistemas agroforestales, pues proporcionan sombra, mejoran la fertilidad del suelo mediante de fijación de nitrógeno y proveen de sombra para el café y la mejora de la estructura del suelo (Torquebiau, 2024; Farfán-Valencia, 2014).

En el piso bajo, predominaron los frutales como *Citrus sinensis* y *Bactris gasipaes*, mismas que destacan por su alta demanda potencial de tipo comercial. Estas especies cuentan con un importante valor económico en el mercado, utilizadas a nivel local, lo que las convierte en especies con potencial para ser comercializadas a mayor escala beneficiando a los productores locales (Chemeda et al., 2022).

Por lo tanto, es clave que los productores pertenecientes a la APECAP puedan desarrollar estrategias de manejo de las especies, pues la presencia de árboles maderables y frutales de alta importancia biofísica y socioeconómica, permitirían maximizar los beneficios de los sistemas productivos garantizando así una seguridad alimentaria y conservación de la biodiversidad (Ponce Vaca et al., 2018).

Entre algunas estrategias que podrían considerarse están el manejo de la regeneración de especies arbóreas, las distancias de plantación adecuadas entre especies y cultivos, el manejo de la sombra, el fomento a la comercialización de productos diferentes a la madera de especies como *Bactris gasipaes* y cítricos, trayendo consigo un aumento de la productividad y sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agroforestales con beneficios tangibles para los productores (Ponce Vaca et al., 2018; Correia et al., 2010).

### **Especies potenciales para asociación con *Coffea arabica* L.**

La agrupación de las especies, con  $DAP \geq 5$  cm, en categorías de adecuación facilitó la selección de las mismas en cuanto a su potencialidad para formar parte de cultivos con *C. arabica*. El 22 % de las especies fueron clasificadas como muy adecuadas lo que refleja el alto potencial de estas para proporcionar beneficios ecológicos y socioeconómicos para los productores APECAP (Castillo-Angulo et al., 2021).

Otro importante grupo de especies fueron agrupadas como adecuadas porque son de interés para los productores y brindan beneficios importantes como la provisión de sombra, producción de madera y frutos, y contribuyen a la estabilidad del sistema agroforestal. Un caso particular lo representa *Musa x paradisiaca*, que a pesar de no ser una especie forestal representa un cultivo que genera beneficios económicos directos para los productores por tener un valor importante en los mercados locales, también incrementan la biodiversidad del sistema (Chemeda et al., 2022), tal como lo han demostrado otros estudios en sistemas agroforestales similares (Valencia et al., 2014).

Es importante destacar especies como *Inga spectabilis* y *Erythrina ulei* que poseen un valor ecológico significativo

para los cultivos con *C. arabica*, debido a su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo al fijar nitrógeno, lo que mejora la productividad del café y la salud del suelo (Torquebiau, 2024). Especies maderables como *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora* y *Pouteria lúcum* son también importantes porque aportan con beneficios como la provisión de sombra para los cultivos, definen la estructura vertical del sistema y proveer de ingresos a largo plazo por el valor de la madera.

Los atributos ecológicos, productivos y comerciales de las especies evaluadas confirman su papel estratégico dentro del aprovechamiento sostenible de la tierra en sistemas agroforestales asociados con café. Al generar beneficios múltiples como la provisión de sombra, mejora del suelo, diversificación de ingresos económicos y aumento de la biodiversidad, estas especies forestales permiten optimizar el uso de la tierra sin comprometer sus funciones ecológicas, contribuyendo así a la formación de sistemas de producción más resilientes, sostenibles y adaptados a las necesidades locales.

## **CONCLUSIONES**

La composición y diversidad de especies con  $DAP \geq 5$  cm en asociación con el cultivo de *C. arabica*, entre los pisos altitudinales alto y bajo, fue alta sin presentar diferencias significativas, lo que resulta fundamental para la estabilidad ecológica, resiliencia y sostenibilidad de los sistemas agroforestales. Un importante número de especies con  $DAP \geq 5$  cm fueron determinadas como de alta importancia ecológica destacando entre estas a las especies frutales, lo que determina que la importancia ecológica de las especies está relacionado con la necesidad de obtener beneficios económicos directos a corto plazo. En cuanto a las especies consideradas como potenciales para asociación con cultivo de *C. arabica* se estableció una combinación de especies capaces de proporcionar una diversidad de beneficios ecológicos, socioeconómicos y estabilidad de la integridad ecológica de los sistemas agroforestales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Extendemos los respectivos agradecimientos a la Asociación Agro artesanal de Productores Ecológicos de Palanda y Chinchipe (APECAP) y a los propietarios de las fincas que permitieron realizar los debidos estudios, así como por el tiempo brindado en el acompañamiento y facilitación de la información.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa para el desarrollo de la presente investigación.

## **REFERENCIAS**

- Castillo-Angulo, K. D., Rincón-Bravo, K. L., Yela-Lara, S. del M., y Ordóñez-Jurado, H. R. (2021). *Especies forestales con potencial agroforestal en el Consejo Comunitario Alto Mira y Frontera (Tumaco, Colombia)*. <https://dx.doi.org/10.14482/inde.39.1.634.99>
- Celi-Delgado, L., y Aguirre-Mendoza, Z. (2022). *Caracterización de los sistemas agroforestales tradicionales de la parroquia Zumba, cantón Chinchipe, Ecuador*.

- Chemeda, B. A., Wakjira, F. S., y Hizikias, E. B. (2022). Tree diversity and biomass carbon stock analysis along altitudinal gradients in coffee-based agroforestry system of Western Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 8(1), 2123767. <https://doi.org/10.1080/23311932.2022.2123767>
- Correia, M., Diabaté, M., Beavogui, P., Guilavogui, K., Lamanda, N., y de Foresta, H. (2010). Conserving forest tree diversity in Guinée Forestière (Guinea, West Africa): The role of coffee-based agroforests. *Biodiversity and Conservation*, 19(6), 1725–1747. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9800-6>
- Escobar, F., Lobo, J., y Halffter, G. (2005). *Altitudinal variation of dung beetle (Scarabaeidae: Scarabaeinae) assemblages in the Colombian Andes*. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00161.x>
- Farfán-Valencia, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*. 342
- Fischer, M., Weyand, A., Rudmann-Maurer, K., y Stöcklin, J. (2011). Adaptation of *Poa alpina* to altitude and land use in the Swiss Alps. *Alpine Botany*, 121(2), 91–105. <https://doi.org/10.1007/s00035-011-0096-2>
- GAD Palanda, P. (2020). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL*
- Muñoz, D. A., Calvache M., D., y Yela, J. F. (2013). *Especies forestales con potencial agroforestal para las zonas altas en el Departamento de Nariño*.
- Nair, P. K. R. (2011). Agroforestry Systems and Environmental Quality: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 40(3), 784–790. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0076>
- Ponce Vaca, L. A., Orellana Suarez, K. D., Acuña Velásquez, sidro R., Alfonso Alemán, J. L., y Fuentes Figueroa, T. (2018). *Situación de la caficultura ecuatoriana: Perspectivas*. 15(1), 307-325
- Ramos-Veintimilla, R., Nieto, C., y Galarza-Rosales, J. (2005). *La agroforestería una alternativa productiva y ambiental para la sierra ecuatoriana*.
- Romero Mejía, A. (2005). *Propuesta metodológica para seleccionar especies pioneras leñosas con fines de restauración ecológica, dentro de la Reserva Biológica Cachalú (Encio-Santander)*. 9.
- Tesfay, F., Moges, Y., y Asfaw, Z. (2022). Woody Species Composition, Structure, and Carbon Stock of Coffee-Based Agroforestry System along an Elevation Gradient in the Moist Mid-Highlands of Southern Ethiopia. *International Journal of Forestry Research*, 2022(1), 4729336. <https://doi.org/10.1155/2022/4729336>
- Torquebiau, E. (2024). *Tropical Forest Issues*. <http://doi.org/10.55515/OEQC4236>
- Vaca, L. A. P., Velázquez, I. R. A., Ponce, P. P., y Suárez, K. D. O. (2018). *El sistema agroforestal cafetalero. Su importancia para la seguridad agroalimentaria y nutricional en Ecuador*. 6
- Valencia, V., García-Barrios, L., West, P., Sterling, E. J., y Naeem, S. (2014). The role of coffee agroforestry in the conservation of tree diversity and community composition of native forests in a Biosphere Reserve. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.024>
- Zapata Arango, P. C. (2019). *Composición y estructura del Dosel de Sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia*

# Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la ciudad de Loja, Ecuador

## *Ecosystem services of urban trees in the city of Loja, Ecuador*

Deicy Lozano <sup>1,\*</sup>, María Fernanda Macas <sup>1</sup>, Nohemi Jumbo <sup>1</sup>, Paulina Fernández <sup>2</sup> y Darwin Pucha <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

<sup>2</sup> Carrera de Agronomía, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

\* Autor para correspondencia: deicy.lozano@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 13/11/2024

Fecha de aceptación del manuscrito: 28/04/2025

Fecha de publicación: 30/06/2025

**Resumen**—Los árboles urbanos desempeñan un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida en las ciudades, al ofrecer múltiples beneficios ambientales como la regulación del clima local, la provisión de confort térmico y la mitigación del impacto ambiental, contribuyendo así a la sostenibilidad urbana. Sin embargo, persiste un desconocimiento general sobre la provisión de los servicios ecosistémicos (SE) que estos espacios generan. En esta investigación se evaluaron cinco SE: almacenamiento de carbono, producción de oxígeno, hábitat y refugio, calidad del aire, y recreación. Para el almacenamiento de carbono se utilizó una ecuación alométrica basada en el DAP y la densidad de madera. La producción de oxígeno se obtuvo en relación con el carbono secuestrado y los pesos atómicos de carbono y oxígeno. El hábitat y refugio (VHB), se calculó a partir de la densidad de copa (Dc) y perennidad de las hojas (Pn). La calidad del aire se estimó entre la absorción y las emisiones de CO<sub>2</sub>. La recreación se evaluó en parques y la percepción de 620 entrevistados. Se registraron 5 111 individuos, 88 especies, 65 géneros y 34 familias. Se identificaron 10 752,20 Mg C año<sup>-1</sup>; producción de oxígeno 28 672,54 t año<sup>-1</sup> y calidad del aire negativa. *Ocotea* sp., *Ficus benjamina*, *Myrcianthes rhopaloides* y *Callistemon lanceolatus* fueron las especies con mayor VHB. En cuanto a la recreación, las especies con mayor abundancia en los parques fueron: *Salix humboldtiana*, *Fraxinus chinensis* y *Jacaranda mimosifolia*. La cuantificación de SE permitió evidenciar un déficit en la cantidad de árboles para la provisión de servicios de regulación lo cual incide en la calidad de aire negativa, sin embargo, en los otros SE el suministro es bueno, lo cual es importante para la planificación de ciudades sostenibles.

**Palabras clave**—Rasgo funcional, Ecosistema urbano, Cambio climático, Ciudades sostenibles

**Abstract**—Urban trees play a fundamental role in improving the quality of life in cities by providing multiple environmental benefits, such as regulating the local climate, offering thermal comfort, and mitigating environmental impacts, thereby contributing to urban sustainability. However, there is a general lack of awareness regarding the ecosystem services (ES) these spaces provide. In this research, five ES were evaluated: carbon storage, oxygen production, habitat and shelter, air quality, and recreation. For carbon storage, an allometric equation based on DBH and wood density was used. Oxygen production was calculated in relation to sequestered carbon and the atomic weights of carbon and oxygen. Habitat and shelter (HBV) were calculated from crown density (Dc) and leaf perennality (Pn). Air quality was estimated between CO absorption and emissions. Recreation was evaluated in parks and the perception of 620 interviewees. 5 111 individuals, 88 species, 65 genera, and 34 families were recorded. 10 752.20 Mg C year<sup>-1</sup> were identified; oxygen production 28 672.54 t year<sup>-1</sup> and negative air quality. *Ocotea* sp., *Ficus benjamina*, *Myrcianthes rhopaloides* and *Callistemon lanceolatus* were the species with the highest HBV. Regarding recreation, the species with the greatest abundance in the parks were: *Salix humboldtiana*, *Fraxinus chinensis* and *Jacaranda mimosifolia*. The quantification of ES allowed to show a deficit in the number of trees for the provision of regulation services which affects the negative air quality, however, in the other ES the supply is good, which is important for the planning of sustainable cities.

**Keywords**—Functional characteristic, Urban ecosystem, Climate change, Sustainable cities

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas urbanos son elementos fundamentales dentro del entorno de una ciudad, ya que desempeñan un papel crucial en la calidad ambiental urbana (Tovar, 2006). Estos ecosistemas ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos (SE), que son esenciales para promover

la sostenibilidad de las áreas urbanas (Sorensen et al., 1998). Los SE se definen como los beneficios directos e indirectos que las poblaciones humanas obtienen del funcionamiento de los ecosistemas. Dichas funciones ecológicas se refieren a la capacidad de los procesos y componentes naturales para generar bienes y servicios que satisfacen, de manera directa o indirecta, las necesidades humanas (Constanza et al., 1997;

De Groot *et al.*, 2002; Avendaño *et al.*, 2020). Un arbolado urbano diverso, sano y bien gestionado ofrece una variedad de SE, por ejemplo, producción de oxígeno, refugio a la fauna en las ciudades, reduce las partículas contaminantes en el ambiente, temperaturas, escorrentía superficial y los ruidos de las ciudades (Dobbs *et al.*, 2018, Vásquez, 2016).

Uno de los factores que provocan la disminución de áreas verdes en las ciudades es el crecimiento poblacional, que no solo ha generado graves daños a la salud de la población sino a los ecosistemas (Cabezas, 2021). En los países en vías de desarrollo, el rápido crecimiento de la población urbana no ha estado acompañado del correspondiente aumento en la disponibilidad de bienes y servicios básicos como energía, agua potable limpia, vivienda y saneamiento (FAO, 2016). La urbanización se ha traducido esencialmente en una expansión urbana no planificada, acompañada de pautas de producción y consumo no sostenibles, que conducen, a su vez, a la sobreexplotación de los recursos naturales en las áreas urbanas y sus alrededores (Borelli *et al.*, 2018, Castro *et al.*, 2018).

En América Latina, donde más del 80 % de la población vive en zonas urbanas, este crecimiento desordenado, ha ejercido una fuerte presión sobre los ecosistemas urbanos afectando especialmente al arbolado y los bosques urbanos (Corporación Andina de Fomento [CAF], 2018). Como consecuencia, ciudades de países como Uruguay (95,77 %), Argentina (92,46 %), Brasil (87,79 %), Colombia (82,35 %) y Ecuador (64,79 %), que han experimentado un acelerado crecimiento urbano debido a la migración hacia las ciudades — una tendencia que se mantuvo hasta 2023 y se espera continúe en las próximas décadas (The Global Economy, 2025)—, se han vuelto especialmente vulnerables a los efectos negativos del cambio climático, como sequías, inundaciones, olas de calor y el aumento de la temperatura (Naciones Unidas, 2016; FAO, 2016).

El arbolado urbano es una forma de mitigar este tipo de efectos adversos del cambio climático en los centros poblados (Escobedo *et al.*, 2011); de manera directa, capturan y secuestran carbono por largos periodos, ayudan a la filtración de aguas de escorrentía y minimizan el efecto de las olas de calor suprimiendo las islas de calor con la provisión de sombra y aire fresco bajo su dosel; y de manera indirecta, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>, al reducir los consumos de energía necesarios para proveer aire fresco artificial (Vargas-Gómez y Molina-Prieto, 2014).

Los bosques urbanos son considerados herramientas valiosas en el diseño de ciudades modernas y resilientes (Calaza *et al.*, 2018, Wolf, 2017). Sin embargo, la escasa difusión y comprensión sobre el valor ecológico, social y cultural de los bosques urbanos por parte de la población en general ha llevado a un desconocimiento que limita la participación ciudadana en su protección, reduce el respaldo a políticas de conservación y favorece su degradación progresiva. Reconocer y valorar estos entornos como componentes esenciales del bienestar urbano es fundamental para fomentar una relación más consciente y responsable con el entorno natural dentro de las ciudades. Ante esta realidad, es necesario conocer la capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos y la percepción de la ciudadanía, además, el manejo del arbolado urbano en las ciudades, con el fin de formular directrices técnicas para la gestión, conservación y uso sostenible de este recurso (Pacha, 2014; Reyes y Gutiérrez, 2010).

Los servicios ecosistémicos del arbolado urbano, como la captura de carbono, producción de oxígeno, provisión de hábitat, recreación y mejora de la calidad del aire, no han sido cuantificados ni valorados de manera integral en Loja, lo que limita su incorporación efectiva en la gestión urbana (CAF, 2018). En contraste, existen experiencias internacionales que demuestran el potencial de estas evaluaciones para mejorar la planificación ambiental urbana. En Bogotá (Colombia), estudios como el de Montes-Pulido y Forero (2021) han cuantificado servicios de regulación y culturales en parques urbanos, evidenciando desigualdades socioespaciales en su provisión. Asimismo, el caso de la Plaza Alhambra evaluó soluciones basadas en la naturaleza implementadas en el espacio público, mostrando beneficios ecológicos y sociales significativos (Ramírez *et al.*, 2022). En Barcelona (España), se aplicó el modelo *i-Tree Eco* para valorar cómo los bosques urbanos contribuyen a la purificación del aire y a la mitigación del cambio climático, aportando información clave para las políticas de sostenibilidad urbana (Baró *et al.*, 2014). Por lo tanto, en esta investigación el objetivo fue evaluar el valor funcional ecológico de la provisión de cinco servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la ciudad de Loja.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

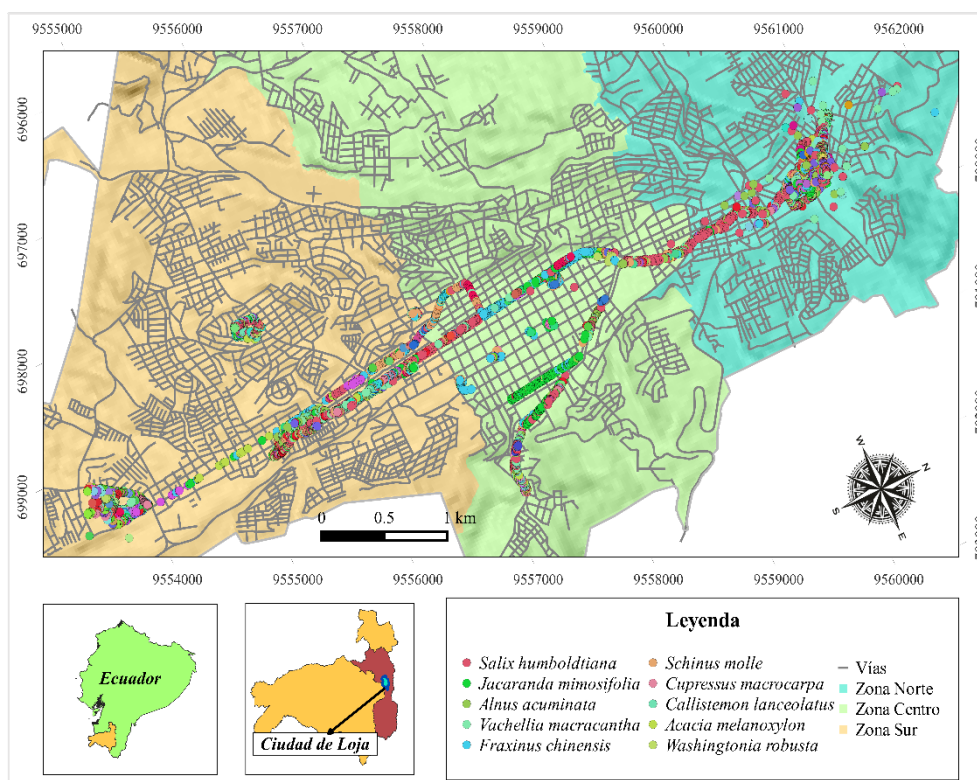
El estudio fue realizado en los principales parques y avenidas de la ciudad de Loja (Figura 1). La ciudad de Loja está ubicada en el cantón y provincia de Loja en la Región Sur del Ecuador entre las latitudes Sur: -3,99313 y -79,20422, tiene una superficie de 6 038,88 ha, está ubicada en un rango altitudinal entre 2 100 a 2 700 msnm (Cornejo y Zorrilla, 2013; Pucha *et al.*, 2023). Posee un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo con una temperatura media anual de 15 °C y sus valores de precipitación fluctúan alrededor de los 900 mm/año, con una humedad relativa media del aire del 75 % (PNUMA *et al.* 2007; PDOT GADM Loja, 2021).

### Muestreo y levantamiento de información

Los servicios ecosistémicos estimados fueron: i) almacenamiento de carbono, ii) producción de oxígeno, iii) hábitat y refugio, iv) calidad del aire, y v) recreación (Tabla 1). Este estudio se basó en una muestra de 5 111 árboles  $\geq$  DAP<sub>5cm</sub> en parques y avenidas de la zona norte, centro y sur de la ciudad de Loja, sin considerar las palmas. A continuación, se describe la metodología de cada uno de los servicios ecosistémicos estudiados.

### Almacenamiento de carbono

Para calcular el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea del arbolado urbano se utilizó la base de datos del inventario forestal del proyecto de investigación 17-DI-FARNR-2021: “*Dinámica de crecimiento y servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la ciudad de Loja*” desarrollado por la Universidad Nacional de Loja. La estimación de la biomasa arbórea fue calculada aplicando la ecuación alométrica de Chave *et al.*, (2014) el cual es un método no destructivo para estimar la biomasa total de un árbol. Esta ecuación consideró las variables independientes como la densidad



**Fig. 1:** Área de estudio del arbolado urbano de la ciudad de Loja, Ecuador

de la madera por especie y el diámetro del árbol. La mayoría de los valores de densidad de la madera fueron obtenidos de la base de datos global de densidad de madera (Zanne et al., 2012) y la densidad de madera de las especies que no se encontró en dicha base de datos se la obtuvo del estudio realizado por Cartuche (2022). A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de la biomasa.

$$B = \exp \left( -1,803 - 0,976 \times E + 0,976 \times \ln(\rho) + 2,673 \times \ln(\text{DAP}) - 0,0299 \times [\ln(\text{DAP})]^2 \right) \quad (1)$$

donde: B = Biomasa (kg);  $\rho$  = Densidad de la madera ( $\text{g cm}^{-3}$ ); E = Factor de estrés ambiental;  $\ln$  = Logaritmo natural; DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

A partir de los datos obtenidos de la estimación de la biomasa fue determinado el almacenamiento de carbono por medio de la siguiente ecuación (Brown et al., 1986):

$$C = 0,47 \times B \quad (2)$$

donde: C = Almacenamiento de carbono en  $\text{t ha}^{-1}$ ; 0,47 = Factor de conversión de biomasa para carbono; B = Biomasa forestal en  $\text{t ha}^{-1}$

### Producción de oxígeno

Para determinar la producción de oxígeno de un árbol durante un año se tomó en cuenta la cantidad de carbono almacenado en la biomasa, para ello se aplicó la metodología de Salisbury y Ross (1978) que establece que la producción neta de oxígeno de los árboles se basa en la cantidad de oxígeno producido durante la fotosíntesis menos la cantidad de oxígeno consumido durante la respiración de las plantas.

$$\text{Fotosíntesis} = n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{luz} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + n\text{O}_2 \quad (3)$$

$$\text{Respiración} = (\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{O}_2 \rightarrow n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{energía} \quad (4)$$

De esta manera, la cantidad de oxígeno producido por el arbolado urbano fue estimada a partir de la captura de carbono en base a los pesos atómicos:

$$\text{Producción neta de O}_2 \text{ (kg/ao)} = \text{Carbono secuestrado en la biomasa (kg/ao)} \times \frac{32}{12} \quad (5)$$

### Hábitat y refugio

La evaluación del hábitat y refugio se desarrolló considerando el inventario forestal del proyecto de investigación 17-DI-FARNR-2021: *Dinámica de crecimiento y servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la ciudad de Loja*. Para lo cual se determinó la densidad de la copa (Dc) y perennidad de follaje (Pn) de cada árbol según su potencial para proporcionar hábitat y refugio de avifauna (VHB). Para la densidad de la copa se usó una escala ordinal de 1 a 3, colocando el mayor valor (3) a las especies con copa más densa; y para la perennidad de follaje se tomaron en cuenta tres clases: caducifolias (1), subperennifolias (2), y perennifolias (3). Después, se calculó los valores de las clases de cada rasgo con el fin de que la clase subsecuente de densidad del follaje tenga tres veces el valor de la clase anterior, y para las especies perennifolias y subperennifolias 2 y 3 veces el valor de las especies caducifolias. Además, todos los valores se ponderaron con un factor  $i = 100/27$ , de tal manera que puedan expresarse en el intervalo de la escala ordinal (Casanoves et al., 2011). La ecuación para determinar el valor de hábitat y refugio fue:

$$\text{VHB} = 3 d D c^{-1} \times P n \times i \quad (6)$$

donde: VHB= valor de hábitat y conectividad de avifauna

na silvestre; Dc= densidad de la copa; Pn= perennidad del follaje; factor  $i = 100/27$ .

### Estimación de la calidad del aire

Para la estimación de la calidad del aire se tomó en cuenta la producción y absorción de gases dentro de la ciudad. Las emisiones de gases de efecto invernadero fueron cuantificadas a partir de los valores dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) del transporte terrestre particular de personas, información otorgada por la Comisión de tránsito de Loja para el año 2023. Para realizar el balance entre la producción y absorción fue utilizada la fórmula propuesta por López Huertas, (2019):

$$Abs = B \times Cc \quad (7)$$

$$Ems = V \times EmsP \quad (8)$$

$$CA = Abs - Ems \quad (9)$$

donde: Abs = Absorciones de CO<sub>2</sub>; B = Bosque en áreas verdes medido en hectáreas; Cc = Capacidad de captura del bosque en toneladas por año; Ems = Emisiones de CO<sub>2</sub>; V= número de vehículos; EmsP= Emisiones promedio de los vehículos; CA= Calidad del aire.

### Recreación

Para evaluar este servicio ecosistémico se describieron las preferencias de recreación en la población de la ciudad de Loja mediante la aplicación de las 620 entrevistas. Las preguntas sobre la recreación estuvieron orientadas a la recopilación de información del conocimiento de las áreas verdes, tiempo de permanencia y preferencias de zonas de recreación de la población en estudio. Así mismo, se identificó las especies con mayor abundancia en los parques de la ciudad de Loja.

### Análisis de datos

Para comparar los servicios ecosistémicos entre las zonas norte, centro, y sur de la ciudad se realizaron histogramas de distribución de frecuencias de las especies con mayor acumulación de carbono del arbolado urbano. Así mismo, histogramas de las especies con mayores índices de valor de hábitat y refugio. Posteriormente, se comparó las variables acumulación de carbono y producción de oxígeno del arbolado urbano mediante el análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico de Kruskal Wallis (al no cumplir con el supuesto de normalidad) y el test de comparación de medias de Wilcoxon con ajuste de Bonferroni, los resultados se presentan en gráficos de barras para cada una de las variables. Los análisis se realizaron mediante el uso del software de hojas de cálculo Microsoft Excel y el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

## RESULTADOS

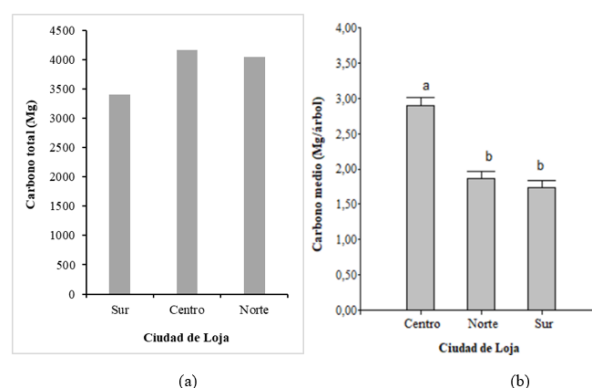
En el arbolado de la ciudad de Loja fueron registrados 5111 individuos  $\geq 5$ cm DAP que corresponde a 88 especies, 65 géneros, 34 familias con hábitos de crecimiento de árboles y arbustos, excepto palmas. La familia Fabaceae fue la más

rica con 17 especies identificadas, seguida por Myrtaceae con 11 sp. Por su parte, las familias Bignoniaceae, Moraceae y Rosaceae registraron 5 especies cada una. (Tabla 2).

### Almacenamiento y almacenamiento de carbono

El almacenamiento de carbono estimado en el arbolado urbano de la ciudad de Loja fue de 10 752,20 Mg C (Tabla 3). En el sector centro de la ciudad se cuantificó en total 4099,68 Mg C en norte 3 232,06 Mg C y en el sur 3 420,46 Mg de carbono en los árboles. El centro de la ciudad de Loja presentó la mayor acumulación de carbono en el arbolado urbano de las avenidas, mientras que la menor acumulación de carbono fue estimada en los parques (Tabla 3).

En la ciudad de Loja el almacenamiento de carbono por árbol fue de 2,10 Mg/árbol. Al comparar el almacenamiento de carbono entre los árboles urbanos de las zonas norte, centro y sur de la ciudad se obtuvo diferencias estadísticas ( $p < 0,0001$ ) (Figura 2). Los árboles del centro almacenan la mayor cantidad de carbono con 2,90 Mg/árbol en comparación con los árboles del norte y sur de la ciudad (Figura 2).



**Fig. 2:** Almacenamiento de carbono en los árboles urbanos: a) almacenamiento total de carbono en las zonas norte, centro y sur de la ciudad de Loja b) carbono medio por árbol

*Salix humboldtiana* (sauce), con una acumulación de 1 339,12 Mg de carbono, y *Schinus molle* (molle), con 479,65 Mg, fueron las especies arbóreas con mayor acumulación de carbono. En contraste, las especies con menor acumulación fueron *Alnus acuminata*, con 67,29 Mg, y *Muntingia calabura*, con 27,37 Mg en la ciudad de Loja (Figura 3).

### Producción de oxígeno

La producción de oxígeno en la ciudad de Loja fue de 28 672,54 t O<sub>2</sub>, con mayor producción de oxígeno en las avenidas. En cuanto a las zonas, el centro se destacó en la producción de oxígeno con 10 932,49 t O<sub>2</sub> (Tabla 4).

En la ciudad de Loja la producción de oxígeno por árbol fue 5,6 Mg O<sub>2</sub>, notándose una diferencia estadística ( $p < 0,0001$ ) entre las zonas norte, centro y sur de las avenidas y parques. El arbolado de la zona del centro en media aportó la mayor producción de oxígeno por árbol con 7,73 Mg O<sub>2</sub>; además, los árboles de los parques del centro producen la mayor cantidad de oxígeno, en promedio 10,52 Mg O<sub>2</sub> por árbol (Figura 4).

*Salix humboldtiana* (sauce), con una producción de

**Tabla 1:** Resumen de los métodos aplicados para estimar los servicios ecosistémicos evaluados en el arbolado urbano de la ciudad de Loja

| Servicio ecosistémico     | Rasgo funcional                                                                    | Ecuaciones                                                                       | Referencia                             |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Almacenamiento de carbono | Densidad de la madera ( $\text{g/cm}^3$ )<br>Diámetro a la altura del pecho (cm)   | $AGB = \exp(-1,803 - 0,976E + 0,976\ln(p) + 2,673\ln(DAP) - 0,0299(\ln(DAP))^2)$ | Chave <i>et al.</i> , 2014             |
| Producción de oxígeno     | Carbono secuestrado en la biomasa ( $\text{t/año}$ )                               | $PO = \text{Carbono secuestrado en la biomasa} \times \frac{32}{12}$             | Salisbury y Ross, 1978                 |
| Hábitat y refugio         | Densidad de la copa<br>Perenidad de la copa                                        | $VH = (Dc^{-1}) \times Pn \times i$                                              | Casanoves <i>et al.</i> , 2011         |
| Calidad de aire           | Carbono secuestrado en la biomasa ( $\text{t/año}$ )<br>Emisiones de $\text{CO}_2$ | $Abs = B \times Cc$<br>$Ems = V \times EmsP$<br>$CA = Abs - Ems$                 | López Huertas, 2019                    |
| Recreación                | Especies sobresalientes<br>Frecuencia especies                                     | Entrevistas                                                                      | Hernández Santoyo <i>et al.</i> , 2013 |

**Tabla 2:** Composición florística del arbolado urbano de la ciudad de Loja.

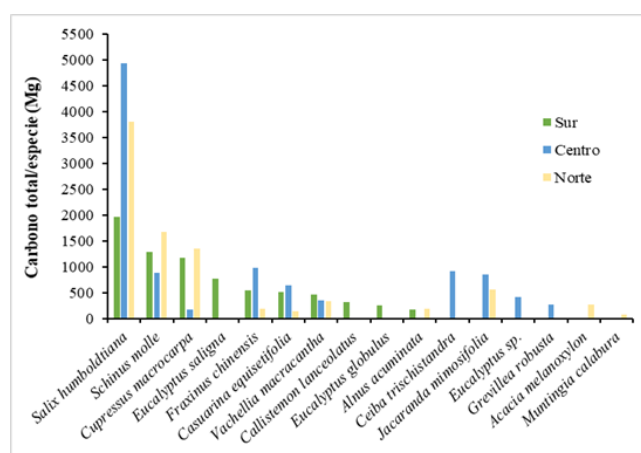
| Zona          | Familia | Género | Especies |
|---------------|---------|--------|----------|
| <b>Centro</b> |         |        |          |
| Avenidas      | 22      | 34     | 39       |
| Parques       | 15      | 22     | 23       |
| <b>Sur</b>    |         |        |          |
| Avenida       | 23      | 32     | 34       |
| Campus UNL    | 25      | 41     | 52       |
| Parques       | 20      | 28     | 31       |
| <b>Norte</b>  |         |        |          |
| Parque        | 29      | 47     | 59       |

**Tabla 3:** Cuantificación del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono en la ciudad de Loja.

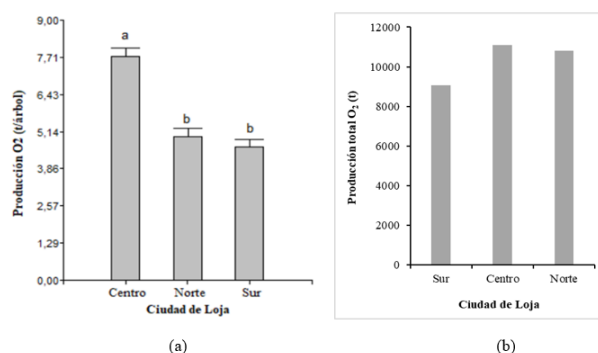
| Zona          | Abundancia (# ind.) | DAP (cm)     | Carbono total (Mg) | Media Carbono (Mg/árbol) |
|---------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------------------|
| <b>Centro</b> | <b>1414</b>         | <b>42,50</b> | <b>4099,68</b>     | <b>2,90</b>              |
| Avenida       | 1256                | 41,82        | 3476,19            | 2,77                     |
| Parque        | 158                 | 47,93        | 623,49             | 3,95                     |
| <b>Sur</b>    | <b>1866</b>         | <b>30,83</b> | <b>3232,06</b>     | <b>1,73</b>              |
| Avenida       | 558                 | 34,85        | 1380,34            | 2,47                     |
| Campus UNL    | 456                 | 35,31        | 1009,41            | 2,21                     |
| Parque        | 852                 | 25,81        | 842,31             | 0,99                     |
| <b>Norte</b>  | <b>1831</b>         | <b>34,34</b> | <b>3420,46</b>     | <b>1,87</b>              |
| Parque        | 1831                | 34,34        | 3420,46            | 1,87                     |
| <b>Total</b>  | <b>5111</b>         | <b>35,31</b> | <b>10752,20</b>    | <b>2,10</b>              |

**Tabla 4:** Estimación de la producción de oxígeno en las zonas centro, norte y sur, y en avenidas y parques, de la ciudad de Loja, Ecuador.

| Zona          | Abundancia (# ind.) | Carbono total (Mg) | Producción total $\text{O}_2$ (t) | Media de Producción $\text{O}_2$ ( $\text{t/árbol}$ ) |
|---------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Centro</b> | <b>1414</b>         | <b>4099,68</b>     | <b>10932,49</b>                   | <b>7,73</b>                                           |
| Avenida       | 1256                | 3476,19            | 9269,84                           | 7,38                                                  |
| Parque        | 158                 | 623,49             | 1662,65                           | 10,52                                                 |
| <b>Sur</b>    | <b>1866</b>         | <b>3232,06</b>     | <b>8618,82</b>                    | <b>4,62</b>                                           |
| Avenida       | 558                 | 1380,34            | 3680,89                           | 6,60                                                  |
| Campus UNL    | 456                 | 1009,41            | 2691,77                           | 5,90                                                  |
| Parque        | 852                 | 842,31             | 2246,16                           | 2,64                                                  |
| <b>Norte</b>  | <b>1831</b>         | <b>3420,46</b>     | <b>9121,23</b>                    | <b>4,98</b>                                           |
| Parque        | 1831                | 3420,46            | 9121,23                           | 4,98                                                  |
| <b>Total</b>  | <b>5111</b>         | <b>10752,20</b>    | <b>28672,54</b>                   | <b>5,61</b>                                           |



**Fig. 3:** Acumulación de carbono total (Mg) por cada especie en las zonas: norte, centro y sur de la ciudad de Loja, Ecuador

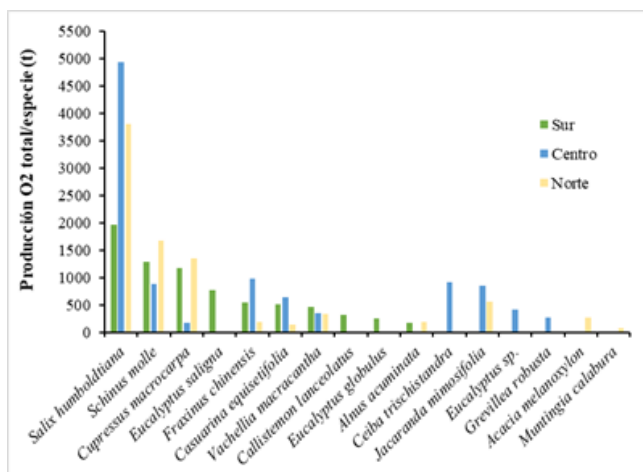


**Fig. 4:** Comparación de la producción de oxígeno (a) por árbol y (b) total, entre las zonas norte, centro y sur de la ciudad de Loja

3.570,98 t de  $\text{O}_2$ , y *Schinus molle* (molle), con 1.279,05 t de  $\text{O}_2$ , fueron las especies arbóreas con mayor generación de oxígeno. En contraste, *Alnus acuminata* y *Muntingia calabura* fueron las especies con menor producción de oxígeno en la ciudad de Loja (Figura 5).

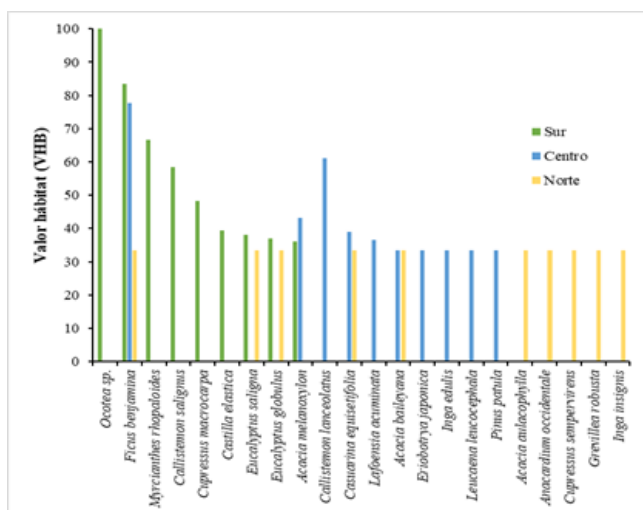
### Hábitat y refugio

En la zona sur *Ocotea* sp., *Ficus benjamina* (ficus) y *Myrcianthes rhopaloides* (arrayán negro) fueron las especies que tuvieron mayor potencial para el servicio ecosistémico de hábitat y refugio porque son especies perennifolias con follaje



**Fig. 5:** Producción de oxígeno total (Mg) por cada especie en las zonas: norte, centro y sur de la ciudad de Loja, Ecuador

denso. Mientras que en el centro de la ciudad fueron *Ficus benjamina* (ficus) y *Callistemon lanceolatus* (cepillo chino), y en la zona norte fueron todas las especies las que presentaron homogeneidad para brindar hábitat y refugios especialmente para la avifauna (Figura 6).



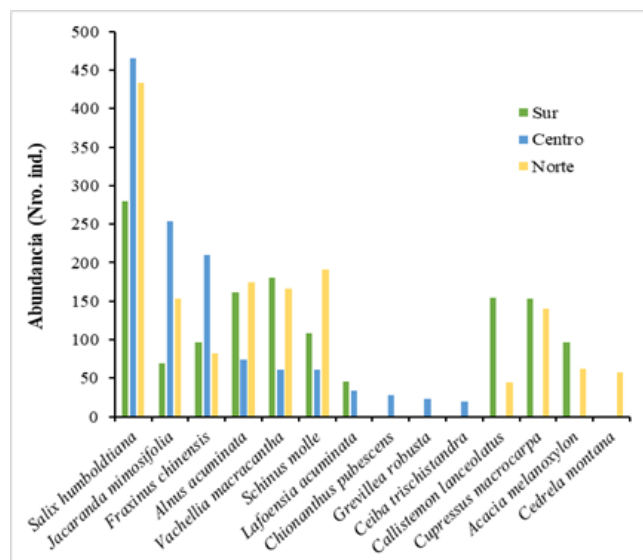
**Fig. 6:** Valor funcional del hábitat y refugio (VHB) de las especies forestales en la zona norte, centro y sur de la ciudad de Loja, Ecuador

## Recreación

Las especies con mayor abundancia en los parques de la ciudad fueron: *Salix humboldtiana* (sauce), *Fraxinus chinensis* (fresno) y *Jacaranda mimosifolia* (arabisco), debido a que son especies con gran altura y tiene copa frondosa (Figura 7).

*Salix humboldtiana* (sauce), *Alnus acuminata* (aliso) y *Vachellia macrocarpa* (faique) fueron las especies con mayor abundancia en los parques: Jipiro, Daniel Álvarez, Parque de la música y Peñón del Oeste. Mientras que, *Fraxinus chinensis* (fresno), *Schinus molle* (molle) y *Jacaranda mimosifolia* (arabisco) fueron las más abundantes en los parques: San Sebastián, Central, Simon Bolivar, infantil “Bernabé Luis”, “Los Molinos”, y Lineal La Tebaida.

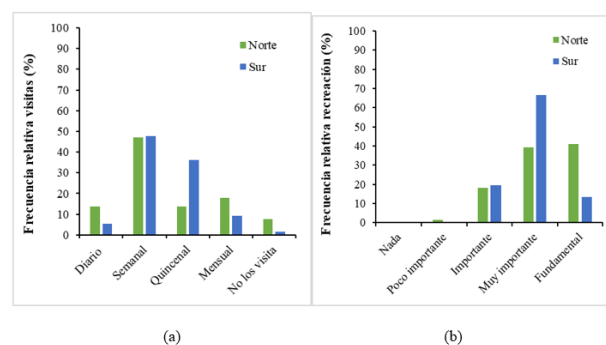
En las zonas norte y sur de la ciudad de Loja el 47 % y 48 % respectivamente de los entrevistados, mencionaron que



**Fig. 7:** Especies arbóreas con mayor abundancia en los parques de la zona norte, centro y sur de la ciudad de Loja.

visitan los parques semanalmente. Otros entrevistados, de la zona sur con un 36 % manifiestan que visitan los parques quincenalmente, y un bajo porcentaje indicó que no los visitan frecuentemente (Figura 8a).

El 67 % de los entrevistados indicaron que los parques son muy importantes para brindar recreación en la zona sur de la ciudad de Loja porque les genera una sensación de bienestar y es bueno para la salud, mientras que el 41 % de los entrevistados en la zona norte consideran que los parques son fundamentales para la recreación. El 37 % de los entrevistados señalaron que no los visitan los parques debido a factores tales como: inseguridad, falta de tiempo y mantenimiento de las áreas verdes e infraestructura (Figura 8b).



**Fig. 8:** a) Frecuencia relativa de las visitas a los parques y b) importancia de los árboles para mantener la convivencia y actividades de recreación familiar.

## Calidad del aire

La calidad del aire en el sector sur de la ciudad de Loja fue negativa de 112 986,8 CO<sub>2</sub> /Mg (año), es decir, que del total de emisiones de CO<sub>2</sub>/Mg (año) solo el 3,95 % es absorbido por los árboles, por tal motivo la calidad del aire es mala en relación de la capacidad de captura de CO<sub>2</sub>, por los árboles (Tabla 5).

**Tabla 5:** Calidad del aire de la ciudad de Loja en función del arbolado urbano.

| Capacidad de captura del área verde (Mg) | Emisiones de CO <sub>2</sub> /Mg (año) | Número de vehículos | Emisiones promedio de los vehículos CO <sub>2</sub> (Mg/año) | Absorciones (Abs, Mg/año) | Calidad del aire | Porcentaje (%) |
|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|----------------|
| 51,11                                    | 4,2                                    | 28 009              | 117 637,80                                                   | 4 651,01                  | -112 986,8       | 3,95           |

## DISCUSIÓN

En el estudio realizado en el arbolado urbano de la ciudad de Loja se identificaron hasta la fecha de monitoreo (noviembre 2024), 5 111 individuos, distribuidos en 88 especies, 65 géneros y 34 familias los que brindan diversos servicios ecosistémicos (SE): almacenamiento de carbono; producción de oxígeno; hábitat y refugio; recreación; y calidad ambiental. Estos resultados son similares a los expuestos por Jáuregui et al., (2022) en el estudio del arbolado urbano de Guadalajara en lo referente a 89 especies y 33 familias; difiriendo en el número de individuos con 3 325, lo que permite aducir que el arbolado urbano de la ciudad de Loja presenta mayor abundancia, por tanto, brindará mayores beneficios en los SE.

La familia más abundante en esta investigación fue Fabaceae con 17 especies encontradas, esta familia es predominante en la silvicultura urbana en varias ciudades de Latinoamérica debido a su adaptabilidad y diversidad, aseveración basada en lo que argumenta por Alanís et al., (2022) y Elizondo et al., (2018) en sus estudios realizados en el arbolado urbano en México en donde la familia más representativa son las Fabaceae. Aranguren y Gámez (2010) en su estudio en Mérida Venezuela encontraron 42 especies de Fabaceae en áreas urbanas destacando su prevalencia en parques, jardines y plazas.

La importancia de las especies de la familia Fabaceae se extiende más allá del uso ornamental, ya que son usadas también para la alimentación y uso medicinal (Molares y Ladio, 2011). La abundancia de la familia en entornos urbanos puede atribuirse a su versatilidad ecológica, naturaleza conspicua y múltiples estrategias de adaptación (Molares y Ladio, 2011; Aranguren y Luis E. Gámez, 2010).

### Almacenamiento de carbono

El carbono presente en la atmósfera se captura por las plantas a través de la fotosíntesis; siendo los árboles los que retienen en mayor cantidad de este gas por unidad de área en comparación con otros tipos de vegetación (IPCC, 2007).

Los volúmenes de captura de carbono en las diferentes zonas donde se encuentra el arbolado dependen de la estructura de la vegetación y de la especie, tamaño, edad, DAP (diámetro a la altura del pecho), cobertura de la copa, estado de conservación y manejo (Arévalo 2021).

En el arbolado urbano de la ciudad de Loja se obtiene un almacenamiento de carbono 10 752,20 Mg en 5 111 individuos con un promedio de 35 cm de diámetro, estos resultados difieren de lo reportado por Castillo et al., (2022) en el estudio de captura de carbono del arbolado de la Universidad de Manabí que obtuvieron un resultado de 5 354,43 t de carbono almacenado en 1200 individuos, siendo que el 80% de árboles no superar los 40 cm de diámetro. Estas diferencias en el almacenamiento de carbono se deben a la densidad de

individuos en cada uno de los estudios. Pompa-García et al., (2023) manifiestan que el clima y ubicación geográfica son factores que no solo limitan la cantidad y diversidad de especies arbóreas, sino su capacidad fotosintética, acumulación de carbono y productividad. En el estudio de Reynolds et al., (2017), se determinó que el almacenamiento de carbono en el arbolado urbano del Valle de Aburrá Colombia fue de 103 820 Mg de CO<sub>2</sub>, valores que son diferentes a lo encontrado en nuestra investigación, debido a que en el estudio en Valle de Aburra se consideró a más del área foliar la biomasa abajo del suelo.

La captura de carbono en la zona centro es de 4 099,68 Mg siendo mayor si lo comparamos con el norte (3 232,06) y sur (3 420,45), diferencias que se atribuyen al DAP que es mayor en el centro con 42,50 cm. Investigaciones sobre captura de carbono en árboles demuestran la importancia del diámetro a la altura del pecho (DAP) como factor clave para el almacenamiento de carbono (Sánchez et al., 2021). Cifuentes (2021) argumenta que a medida que el DAP aumenta, también lo hace la biomasa del árbol, lo que resulta en una mayor capacidad para almacenar carbono y que árboles con un DAP > a 30 cm pueden almacenar significativamente más carbono que aquellos con un DAP < 5, esto se debe a que árboles más grandes tienen más tejido vegetal, lo que les permite capturar más CO<sub>2</sub> durante la fotosíntesis; resultado que concuerda con lo alcanzado en esta investigación, ya que a mayor DAP alcanzado por las especies arbóreas en cada zona, mayor la captura de carbono.

En lo referente al almacenamiento de carbono por árbol la zona del centro sigue teniendo mayor almacenamiento con 2,90 Mg/árbol, siendo *Salix humboldtiana* (1 339,12 C/Mg) y *Schinus molle* (479,64 C/Mg) las especies con la mayor acumulación de carbono en los árboles de las zonas centro y sur de la ciudad de Loja. Esto se debe a que son especies que presentan los mayores diámetros.

*Salix humboldtiana* y *Schinus molle* son dos especies arbóreas que destacan por su capacidad para acumular carbono, lo que es fundamental en la lucha contra el cambio climático por emisiones de CO<sub>2</sub> (Chacón y Méndez, 2023). *Salix humboldtiana* es una especie de rápido crecimiento, tiene una alta eficiencia de asimilación de carbono, se adapta a diversas condiciones ambientales lo que contribuye para lograr un diámetro considerable y mayor biomasa permitiendo mayor acumulación de carbono (Chacón y Méndez, 2023). *Schinus molle* es una especie es altamente adaptable y tiene una buena capacidad competitiva para captar luz, agua y nutrientes, esto le permite crecer rápidamente, alcanzando alturas significativas en poco tiempo. Esta especie produce una cantidad considerable de biomasa debido a su crecimiento vigoroso y a la producción abundante de hojas y frutos, lo que contribuye a su capacidad para almacenar carbono en el suelo (Chacón y Méndez, 2023).

Los resultados de esta investigación difieren a lo reportado por Farinango (2020) en su investigación en el arbolado urbano de la cabecera cantonal de Otavalo en donde las especies *Cupressus macrocarpa* y *Fraxinus excelsior* son las que almacenan mayor cantidad de carbono, mientras que el arbolado de la ciudad de Loja fueron *Salix humboldtiana* y *Schinus molle*, las cuales son especies exóticas.

### Producción de Oxígeno

La producción de oxígeno en el arbolado urbano en la ciudad de Loja es de 28 672,54 Mg O<sub>2</sub>, resultado que está en relación con la captura de carbono. Investigaciones indican que existe una fuerte relación entre la producción de oxígeno de un árbol y su capacidad de almacenamiento de carbono. Gaytan et al., (2018) en su investigación denominada árboles consumidores del CO<sub>2</sub> y productores O<sub>2</sub> beneficio para todos, asevera que la cantidad de oxígeno producido por un árbol está directamente relacionada con la cantidad de carbono que secuestra; esto implica que, a mayor almacenamiento de carbono, hay una mayor producción de oxígeno. Matías Barrientos y Cortes Cagüño (2020) en su investigación en Villavicencio, Colombia, encontraron que los árboles de parque fijan cantidades considerables de CO<sub>2</sub> y producen O<sub>2</sub>, estos hallazgos subrayan la importancia de los árboles tanto en entornos naturales como urbanos. Este proceso ocurre durante la fotosíntesis, los árboles capturan CO y lo almacenan en forma de biomasa (madera, raíces, hojas) a través del carbono orgánico, al mismo tiempo, liberan oxígeno como subproducto. Según Nowak et al., (2002), los árboles urbanos en los Estados Unidos almacenan millones de toneladas de carbono anualmente, lo que ayuda a mitigar las emisiones de CO en áreas urbanizadas y a mejorar la calidad del aire al aumentar la disponibilidad de oxígeno en la atmósfera.

Las especies que proveen mayor producción de oxígeno son *Salix humboldtiana*, *Schinus molle* y *Fraxinus chinensis*. En un estudio realizado por Cortés y Matías (2019) el arbolado urbano del municipio de Villavicencio Colombia las especies que proporcionan mayor oxígeno son: *Ficus benjamina*, *Parkia pendula*, *Spondias mombin* y *Cedrela odorata*; especies diferentes a las de este estudio; sin embargo, existen coincidencias con la investigación de Hernández et al., (2023) donde reportó que las principales especies productoras de oxígeno en la Laguna San Baltazar México fueron: *Hesperocyparis lusitanica* Mill, *Casuarina equisetifolia* L. *Fraxinus uhdei* Wenz; *Taxodium huegelii* C. Lawson y *Salix humboldtiana* Willd.; en el caso de *Fraxinus* y *Schinus*, géneros botánicos similares a los de esta investigación.

La producción promedio de oxígeno en esta investigación por cada árbol fue de 5,61 Mg O<sub>2</sub>, valor que es menor al indicado por Martínez-Trinidad et al., (2021) en un estudio de diversidad y servicios ecosistémicos en cuatro parques de Texcoco de Mora, México, en el que se obtuvo 6 Mg O<sub>2</sub> por cada árbol. En la actualidad se puede evidenciar que la producción de oxígeno en las ciudades no solo es esencial para la salud humana, sino que también desempeña un papel crucial en la creación de entornos urbanos sostenibles y saludables. La promoción de espacios verdes y la conservación de los árboles en entornos urbanos son estrategias clave para garantizar la producción continua de oxígeno y mejorar la calidad de vida en las ciudades.

### Hábitat y refugio

Las especies que tienen mayor potencial para el servicio ecosistémico de hábitat y refugio fueron en la zona norte *Ocotea* sp., *Ficus benjamina* (ficus) y *Myrcianthes rhopaloides* (arrayán negro) debido a que son especies perennifolias con follaje denso. Mientras que en el centro de la ciudad *Ficus benjamina* (ficus) y *Callistemon lanceolatus* (cepillo chino), y en la zona sur todas las especies presentaron una homogeneidad para brindar hábitat y refugios, por ejemplo a la avifauna datos que se relacionan con lo acotado por Hernández-Castán et al., (2022) en su estudio en la Laguna de San Baltazar de la ciudad de Puebla México donde las especies *Terminalia catappa*, *Callistemon lanceolatus* y *Acacia dealbata* tienen potencial para brindar hábitat y refugio de avifauna, ya que presentan mayor densidad de copa y perennidad el follaje. Zuñiga et al., (2021) afirma que diversidad juega un papel determinante en la provisión de hábitat para aves y mamíferos que residen en las ciudades y favorecen la conservación de la diversidad biológica, al proveer a la fauna local de hábitat y alimento (Chace y Walsh, 2006; Carbó-Ramírez y Zuria, 2011). Esto indica que el servicio ecosistémico de hábitat y refugio que nos ofrece el arbolado urbano es esencial para: i) mantener la biodiversidad, ya que proporcionan un lugar seguro para anidar y protegerse de los depredadores; ii) control de plagas porque algunas aves desempeñan un papel importante en el control de poblaciones de insectos y roedores, y iii) proporcionan beneficios para la salud mental porque ayudan a reducir el estrés.

El árbol en las ciudades desarrolla funciones ornamentales, paisajísticas y experienciales, constituyendo la expresión de necesidad psicológica de la naturaleza. Aporta equilibrio ecológico, ejerciendo funciones reguladoras y depuradoras de carácter ambiental, abrigo y protección a la fauna y flora, garantizando una mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. El árbol forma parte de su patrimonio histórico, artístico e ingrediente inseparable de la puesta en valor y comprensión, configurando el derecho social al paisaje (Villota, 2015).

### Recreación

Los parques urbanos brindan servicios ecosistémicos cruciales a los habitantes de las ciudades, incluidos servicios culturales y de regulación. En particular, los servicios ecosistémicos que aportan los parques urbanos pueden medirse a escala local permitiendo ver la perspectiva de los habitantes en relación con indicadores de recreación (Breuste et al., 2013).

Los habitantes de la ciudad de Loja encuestados indican que los parques les generan una sensación de bienestar y salud, por la diversidad de especies con características agradables a la vista de los habitantes como: copa frondosa, floración llamativa; las especies que se destacan son *Salix humboldtiana*, *Fraxinus chinensis* y *Jacaranda mimosifolia*. En un estudio realizado por Chicaiza y Rodríguez (2020) en el parque ecológico “La Perla” situado en la ciudad de Lago Agrio manifestó que las especies *Guarea kunthiana*, *Miconia* sp. y *Nectandra guadaripo* son las más abundantes dada por la preferencia que tienen los habitantes ya que les genera tranquilidad y paz.

Los parques urbanos proporcionan belleza paisajística, es-

pacios para la recreación, brindan oportunidad de contacto con la naturaleza; además aportan servicios ambientales que mitigan la contaminación del aire y reducen el ruido (Dobbs et al., 2011; Escobedo et al., 2011; Zhang y Jim, 2014).

Estudios realizados en diferentes ciudades han demostrado que el arbolado urbano presente en parques ofrece oportunidades recreativas, alivio del estrés y mejora del bienestar mental (Gómez y Ballinas, 2022); Madeira y Pivoto, 2023). Las investigaciones indican que los visitantes reconocen que parques que presentan árboles brindan un servicio ecosistémico, en particular de recreación para el ocio familiar, la contemplación de la naturaleza y las actividades físicas (Madeira y Pivoto, 2023).

El arbolado urbano presente en parques en la ciudad de Loja desempeña un papel crucial en la generación de recreación en áreas verdes, no solo mejora la calidad visual y estética, sino que también contribuye a la salud física y mental de quienes disfrutan de estos espacios de recreación. La planificación y conservación adecuadas de áreas verdes con árboles son esenciales para maximizar estos beneficios recreativos.

### Calidad del aire

La calidad del aire de la ciudad de Loja se encuentra en una situación deficiente con base en la relación de almacenamiento de CO<sub>2</sub> y producción de O<sub>2</sub>, ya que el arbolado urbano solo absorbe el 3,95 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> que genera la población. De acuerdo con un estudio realizado por Guallpa (2023) menciona que la absorción de carbono por parte de los espacios verdes, como parques o áreas con vegetación, solo cubre el 0,5 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la población. La principal causa para que esto suceda es el crecimiento indiscriminado del parque automotor, especialmente de vehículos particulares. El aumento en el número de vehículos, especialmente aquellos que utilizan combustibles fósiles, puede contribuir significativamente a la emisión de contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del aire. Por tal motivo, la presencia de árboles en las ciudades desempeña un papel esencial en la mejora y mantenimiento de la calidad del aire, contribuyendo a la salud de los ecosistemas urbanos. Esto se realiza mediante diversos factores como: la fotosíntesis y producción de oxígeno, absorción de contaminantes, reducción de temperaturas, bienestar y salud mental, etc.

Los árboles urbanos desempeñan un papel importante en la mejora de la calidad del aire en las ciudades. Estudios realizados en Santiago de Chile, Madrid, España y Ciudad Juárez, México han demostrado que la vegetación urbana puede ayudar a reducir los contaminantes atmosféricos, en particular las partículas en suspensión y el ozono (O<sub>3</sub>) (Criollo et al., 2016; Guerrero, 2014). Sin embargo, la calidad del aire varía según la especie de árbol y las condiciones ambientales. En Madrid, ciertas especies frondosas mostraron síntomas de estrés por ozono, especialmente en áreas irrigadas (Guerrero, 2014). La distribución y composición de los bosques urbanos también afectan su capacidad de purificación del aire, como se demostró en Fuenlabrada, España (Lozano, 2004). Si bien los árboles urbanos generalmente contribuyen positivamente a la calidad del aire, algunas especies pueden aumentar la formación de ozono a través de emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (Criollo et al., 2016). Por lo

tanto, la selección y gestión cuidadosas de las especies de árboles urbanos son cruciales para maximizar los beneficios de la calidad del aire en las ciudades.

## CONCLUSIONES

El arbolado urbano de la ciudad de Loja se caracteriza por una notable diversidad de especies, entre las que destacan *Salix humboldtiana*, *Schinus molle* y *Jacaranda mimosifolia* por su alta abundancia y significativa provisión de servicios ecosistémicos. Los parques urbanos representan espacios clave para el servicio de recreación, donde especies como *Salix humboldtiana*, *Fraxinus chinensis* y *Jacaranda mimosifolia*, con sus copas frondosas y gran altura, generan una sensación de bienestar en la población. Asimismo, *Ficus benjamina*, *Myrcianthes rhopaloides* y *Callistemon lanceolatus* presentan un alto potencial para la provisión de hábitat en parques y avenidas. No obstante, uno de los principales desafíos identificados es la calidad del aire, ya que solo el 3,95 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> es absorbido por el arbolado, lo que indica un déficit en este servicio de regulación. A pesar de ello, el arbolado urbano contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de 10 752,20 Mg de carbono y una producción media de 5,6 Mg de O<sub>2</sub> por árbol, siendo *Salix humboldtiana* y *Schinus molle* las especies con mayor aporte en la captura de carbono y generación de oxígeno.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja por el financiamiento para el desarrollo del proyecto 17-DI-FARNR-2021, al personal técnico del Laboratorio de Dendrocronología de Maderas Tropicales, y a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal por el soporte en la aplicación de las encuestas de la percepción de los servicios ecosistémicos. A la ciudadanía de Loja por la participación en las encuestas de la presente investigación.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: DL y DP; metodología: DL y MFM; análisis formal: DL; investigación: DL, DP, NJ, PF, MFM; curación de datos: DL y DP; redacción — preparación del borrador original: DL, NJ, PF; redacción — revisión y edición: DL, NH, PF; visualización: DL, NJ, PF; supervisión: DL, NJ, PF. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito. Deicy Lozano: DL. María Fernanda Macas: MFM. Nohemi Jumbo: NJ. Paulina Fernández: PF. Darwin Pucha: DP.

## FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por la Universidad Nacional de Loja, bajo resolución 17-DI-FARNR-2021 del proyecto de investigación: “Dinámica de crecimiento y servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la ciudad de Loja”

## REFERENCIAS

- Alanis, E., Mora, A., Molina, M., Gárate, H., & Sigala, J. (2022). Urban tree characterization in the downtown area of Hualahuises, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(73).
- Aranguren, S., & Gámez, A. (2010). Estructura, composición y diversidad del arbolado urbano de Linares, Nuevo León. *Biology, Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*.
- Arévalo, W., & Alcántara, (2021). Cobertura arbórea y captura de dióxido de carbono en los parques urbanos. *Revista Institutos de Investigación Mineras y Metalúrgicas*.
- Avendaño-Leadem, D. F., Cedeño-Montoya, B. C., & Arroyo-Zeledón, M. S. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central*, (65), 63-90.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J., & Terradas, J. (2014). Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain. *AMBIO*, 43(4), 466–479. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>
- Borelli, S., Conigliaro, M., & Pineda, F. (2018). Los bosques urbanos en el contexto global. *Unasylva*, 69(1), 3-10.
- Cabezas, L. (2021). Diseño de ordenanza municipal para el control y protección del arbolado urbano y áreas verdes en el cantón Riobamba, como estrategia de mitigación al cambio climático y desarrollo sostenible [Tesis de maestría, Universidad Internacional SEK].
- CAF (Corporación Andina de Fomento). (2018). Bosques urbanos y espacios verdes: Recursos arbóreos para ciudades sostenibles y resilientes. CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1324>
- Calaza, P., Carriñanos, F., Escobedo, F., Schwab, J., & Tovar, G. (2018). Crear paisajes urbanos e infraestructura verde. *Unasylva*, 69(1), 11-21.
- Carbó-Ramírez, P., & Zuria, I. (2011). The value of small urban greenspaces for birds in a Mexican city. *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 213-222.
- Chacón, C., & Méndez, M. (2023). Evaluación de diversidad, captura de carbono y material particulado de las especies forestales ornamentales en la zona urbana de Gualaceo. [Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Cuenca, Azuay, Ecuador].
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., y Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20, 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chicaiza, K., & Rodríguez, F. (2020). Valoración económica de los servicios ambientales del parque ecológico recreacional la Perla. *GEOESPACIAL*, 17(1), 39-58.
- Costanza, R., De Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16.
- Cornejo Diego & Zorrilla María. (2013). Análisis de vulnerabilidad del cantón Loja. 1(2), 1–130.
- Corporación Andina de Fomento. (2018). Bosques urbanos y espacios verdes: Recursos arbóreos para ciudades sostenibles y resilientes. CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1324>
- Criollo, C., Assar, C., Cáceres, L., y Préndez, B. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 32(2), 77-86.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- De Groot, R., Wilson, M. & Boumans, R. (2002). Typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393-408.
- Dobbs, A., Eleuterio, A., Montoya, J., & Kendal, D. (2018). Beneficios de la silvicultura urbana y periurbana. *Unasylva*, 69(1), 22-29.
- Dobbs, C., Escobedo, F. J., & Zipperer, W. C. (2011). A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 196-206.
- Elizondo, C., Elizondo, N., Rodríguez, E., Pequeño, M., & Mora, A. (2018). Estructura, composición y diversidad del arbolado urbano de Linares, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48).
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2078-2087.
- FAO. (2016). Impactos de los choques climáticos en el bienestar: evidencia de Uganda. Roma.
- Farinango, J. (2020). Estimación de la captura de carbono del arbolado urbano en la cabecera cantonal de Otavalo, provincia de Imbabura [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].
- Gaytán, R., Nava, A., Pérez, J., & Reza, P. (2018). Árboles consumidores del CO2 y productores de O2: Beneficio para todos. *Tesis de pregrado, Laureate International Universities*.
- Gómez, M., & Ballinas, M. (2022). Percepción de servicios ecosistémicos de parques urbanos en Tuxtla Gutiérrez. *Espacio I + D, Innovación más Desarrollo*, 11(30).
- Gualpa, L. (2023). Análisis del almacenamiento de carbono en los espacios verdes del área urbana del cantón La Troncal [Tesis de pregrado, Universidad Agraria del Ecuador].
- Guerrero, C. (2014). Urban trees and atmospheric pollutants in big cities: Effects in Madrid. *Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid*.
- Hernández, J., Cuesta, E., Ortiz, B., & Rosano, E. (2023). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *Revista Ciencia Ergo-Sum*, 30(2).
- Hernández Santoyo, A., Casas Vilardell, M., León Sánchez, M. A., Caballero, R., y Pérez León, V. E. (2013). La

ciencia económica y el medio Ambiente: un aporte desde la valoración económica ambiental. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, 3(125), 25–38.

López Huertas, M. (2019). Evaluación de los servicios ecosistémicos en la ciudad no planificada: El caso de Quetzaltenango. *REVISTARQUIS*, 9, 129–145.

Lozano, J. (2004). Distribución del arbolado urbano en la ciudad de Fuenlabrada y su contribución a la calidad del aire. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 36(140), 419–427.

Madeira, R., & Pivoto, A. (2023). Parque urbano e serviços ecossistêmicos culturais: Um estudo sobre o parque natural municipal da Lajinha no Município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Revista Eletrônica*, 47.

Martínez-Trinidad, T., Hernández López, P., López-López, S. F., & Mohedano Caballero, L. (2021). Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67).

Molares, S., & Ladio, A. (2011). The usefulness of edible and medicinal Fabaceae in Argentine and Chilean Patagonia: Environmental availability and other sources of supply. *INIBIOMA, Universidad Nacional del Comahue*.

Montes-Pulido, C. R., & Forero, V. F. (2021). Cultural ecosystem services and disservices in an urban park in Bogotá, Colombia. *Ambiente & Sociedade*, 24, e02945. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200294r1vu202114aoc>

Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Almacenamiento y almacenamiento de carbono por árboles urbanos en los EE. UU. *Ambiente Contaminación*, 119, 381–389.

Ordóñez, J. A., Rivera, R., Tapia, M. E., & Ahedo, L. R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7–16.

Pacha, M. J. (2014). Valoración de los servicios ecosistémicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonía. *Brasília, Brasil*.

Pompa-García, M., Vivar-Vivar, E. D., Rubio-Camacho, E. A., & Camarero, J. J. (2023). Rates of stemwood carbon accumulation are linked to hydroclimate variability in Mexican conifers. *Forests*, 14(7), 1381.

Pucha, D., Lozano, D., Jumbo, N., Fernández, P., Armijos, A., Macas, M. F., ... & Merino, B. (2023). Caracterización florística y estructura del arbolado urbano de la ciudad de Loja. *Bosques Latitud Cero*, 13(2), 1–22.

Ramírez, A., Gutiérrez, L., Rodríguez, C., & Sánchez, L. (2022). Ecosystem Services Assessment for Urban Nature-based Solutions Implemented in the Public Space: Case Study of Alhambra Square in Bogotá, Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 867034. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.867034>

Reyes, I., & Gutiérrez, J. (2010). Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. *Quivera*, 12(1).

Reynolds, C., Escobedo, F., Clerici, N., & Zea-Camaño, J. (2017). Does “Greening” of Neotropical Cities Considerably Mitigate Carbon Dioxide Emissions? The Case of Medellín, Colombia. *Sustainability*, 9(5), 1–16.

Salisbury, F., & Ross, C. (1978). *Plant physiology*. Wadsworth Pub. Co.

Sánchez, I., Flores, Y., & León, J. (2021). Captura de carbono en plantación forestal de laurel y sistema agroforestal laurel – café en la Provincia de San Ignacio. *Revista Científica Pakamuros*, 9(4), 160–173.

Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K., & Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*.

The Global Economy. (2025). Ecuador: Percent urban population. En *The Global Economy*. Datos del año 2023. [https://es.theglobaleconomy.com/Ecuador/Percent\\_urban\\_population/](https://es.theglobaleconomy.com/Ecuador/Percent_urban_population/)

Tovar, G. (2006). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Colombia Forestal*, 9(19), 187–205.

Vargas-Gómez, O., & Molina-Prieto, L. F. (2014). Arborizaciones urbanas: Estrategia para mitigar el calentamiento global. *Revista Nodo*, 8(16), 99–108.

Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: El caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 63–86.

Villota, M. 2015. El árbol en la ciudad como elemento de identidad urbana. Campaña para poner el arbolado urbano en valor de Victoria Gasteiz. [en línea] Disponible en: <http://www.vitoriagasteiz.org/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/eu/10/46/61046.pdf>

Wolf, K. (2017). Social aspects of urban forestry and metro nature. In F. Ferrini, C. Konijnendijk van den Bosch, & A. Fini (Eds.), *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 198–207). Routledge.

Zanne, A., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S., Miller, R., Swenson, N., Wiemann, M., & Chave, J. (2012). GlobalWoodDensityDatabase.

Zhang, H., & Jim, C. Y. (2014). Contributions of landscape trees in public housing estates to urban biodiversity in Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(2), 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.009>

Zuñiga, A. V., Farnum, F., & Murillo, V. (2021). Comparación del estrato arbóreo en fragmentos de bosques urbanos de Margarita, Espinar y Davis, Provincia de Colón, República de Panamá. *Scientia*, 31(1), 17–37.

# Spatial Multi-Criteria Assessment for Optimal Biomass Power Plant Siting in Ecuador Using GIS

## Evaluación espacial multicriterio para la localización óptima de plantas de bioenergía en Ecuador usando SIG

María Eliza Vega-Iñiguez<sup>1</sup>, Yulissa del Cisne Marín-Apolo<sup>1</sup> and Danny Ochoa-Correa<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; eliza.vegai@ucuenca.edu.ec, yulissa.marin@ucuenca.edu.ec, danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

\* Corresponding author: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

Reception date of the manuscript: 25/05/2025

Acceptance date of the manuscript: 30/06/2025

Publication date: 30/06/2025

**Abstract**— This study examines the energy and spatial potential of agricultural residues in Ecuador for biomass-based distributed electricity generation. Based on national crop production data, residues from sugarcane, rice, oil palm, and hard corn were quantified, yielding an estimated effective electrical potential of 2407.68 GWh/year. A spatial multi-criteria analysis was conducted using Geographic Information System (GIS) software, integrating road and substation proximity, terrain slope, flood risk, and distance to populated areas. Exclusion layers considered volcanic hazard zones, primary road corridors, and hydrographic basins. The resulting suitability map classified the territory into five levels. Guayas, Los Ríos, and Esmeraldas were identified as provinces combining both resource availability and logistical accessibility. Additionally, a levelized cost of electricity (LCOE) of USD 0.097/kWh was estimated for a 25 MW biomass plant. The methodology is applicable to geographic prospecting and energy potential assessment of other non-conventional renewable energy sources.

**Keywords**—Bioenergy, Multi-criteria analysis, Agricultural biomass, SIG, Ecuador.

**Resumen**— Este estudio evalúa el potencial energético y territorial de los residuos agrícolas en Ecuador para la generación eléctrica descentralizada a partir de biomasa. A partir de datos de producción nacional, se cuantificaron los residuos disponibles de caña de azúcar, arroz, palma aceitera y maíz duro seco, estimando un potencial eléctrico efectivo de 2407.68 GWh/año. Se aplicó un análisis espacial multicriterio en un sistema de información geográfica (SIG), integrando variables como proximidad a carreteras y subestaciones, pendiente del terreno, riesgo de inundaciones y distancia a zonas pobladas. Se excluyeron áreas con restricciones como zonas de amenaza volcánica, vías principales y cuencas hidrográficas. El análisis produjo un mapa nacional de idoneidad, clasificando el territorio en cinco niveles. Las provincias de Guayas, Los Ríos y Esmeraldas concentran condiciones favorables tanto en disponibilidad de biomasa como en accesibilidad logística. Además, se estimó un costo nivelado de electricidad (LCOE) de 0.097 USD/kWh para una planta de 25 MW. La metodología propuesta es aplicable a estudios orientados a la prospección territorial y a la evaluación del potencial energético de otras fuentes renovables no convencionales.

**Palabras clave**—Bioenergía, Análisis multicriterio, Biomasa agrícola, GIS, Ecuador.

## INTRODUCTION

Biomass energy has been explored globally as a way to diversify electricity generation sources, particularly in contexts where agricultural residues are abundant. Unlike other renewable sources that depend on intermittent natural phenomena, biomass allows for dispatchable generation through thermochemical conversion of organic matter. In countries with strong agricultural economies, this approach presents a technically viable method to utilize residual matter that would otherwise be discarded or inefficiently managed (Demirbas, 2001; Zafar, 2022).

In Latin America, Brazil and Colombia have integrated biomass into their energy planning, benefiting from sugar-

cane bagasse and palm residues, respectively (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016; Marín-Apolo y cols., 2025). However, Ecuador has yet to exploit this pathway, despite possessing a similar agricultural structure and residue availability. According to national energy statistics, the country generated 63.45 % of its electricity from hydropower in 2024, while biomass contributed approximately 1.29 % to the overall mix (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCONEL), 2024). This reliance on hydroelectric generation introduces seasonal vulnerabilities, particularly during prolonged dry periods associated with climate variability, as evidenced by energy shortages in 2022 and 2023.

Given this context, agricultural biomass—especially from

high-yield crops such as oil palm (*Elaeis guineensis*), rice, sugarcane, and hard corn—represents a strategic opportunity for decentralized electricity generation. These crops produce residues with acceptable moisture and energy content for direct combustion, with annual production distributed across various provinces. Prior studies in Ecuador have confirmed the physicochemical potential of these materials, but have not addressed their spatial distribution or siting feasibility (Peláez-Samaniego y Espinoza Abad, 2015; Chamba Quezada y Gómez Live, 2020).

The effectiveness of biomass-based generation systems depends on the availability of feedstock and on the siting of processing facilities. Factors such as proximity to road infrastructure, slope, access to substations, and exposure to flood-prone areas affect both construction costs and operational logistics (Kumar y cols., 2006; Morato y cols., 2019). Spatially explicit planning tools, particularly geographic information systems (GIS), allow for the integration of multiple georeferenced variables to support decisions regarding plant location.

In this context, spatial multi-criteria analysis (MCA) provides a systematic framework to incorporate diverse spatial factors into a composite suitability index. MCA has been successfully applied in various studies for energy resource allocation, including wind, solar, and small hydro siting (Malczewski, 1999; Aydin y cols., 2013). Its flexibility lies in the capacity to assign weights to criteria based on technical priorities and local conditions. In previous research conducted in Ecuador, the authors have demonstrated the applicability of this methodology in evaluating locations for submerged hydrokinetic generation, with results consistent with field measurements and hydrodynamic behavior (Salinas-León y Ochoa-Correa, 2025). These precedents support the relevance of MCA as a decision-support tool for territorial planning in renewable energy projects.

This study applies an MCA approach using GIS to identify the most suitable areas for the installation of biomass power plants in Ecuador. The methodology combines residue availability data with logistical, environmental, and infrastructural parameters to build a suitability model through weighted overlay analysis. The approach supports regional planning efforts by generating evidence-based maps that distinguish areas with higher feasibility for biomass energy development. It also provides a technical foundation for future public and private investment initiatives seeking to expand the country's distributed renewable energy capacity.

## MATERIALS AND METHODS

### General Approach

The methodological design combined quantitative energy assessment with geospatial modeling in order to determine technically and geographically feasible locations for biomass power generation in Ecuador. The procedure consisted of three stages. First, agricultural residues were classified and quantified based on crop-specific generation factors. Second, the lower heating value (LHV) of each biomass type was used to estimate the gross energy yield and the effective electrical output. Lastly, spatial suitability was analyzed using GIS, incorporating infrastructure, environmental, and

topographical variables through a MCA.

### Residue Identification and Quantification

The assessment focused on four crops: sugarcane, oil palm, hard corn, and rice. These crops were selected based on three criteria: availability of national production data, volume of residual biomass generated, and compatibility with direct combustion without prior conversion processes.

Residue generation was estimated using residue-to-product ratios (RPR) derived from regional literature and field studies. For sugarcane bagasse, the adopted RPR was 0.3, meaning that 300 kg of dry residue are generated per tonne of harvested cane. For oil palm residues—particularly empty fruit bunches and fibers—the RPR used was 0.26. Hard corn and rice had RPR values of 1.0 and 0.2, respectively, considering stalks and husks as primary combustible fractions (Serrano y cols., 2017; Peláez-Samaniego y Espinoza Abad, 2015).

Since not all the biomass is recoverable for energy use, a 40 % availability factor was applied to each theoretical value to account for soil nutrient recycling needs and technical losses during collection and handling (Chamba Quezada y Gómez Live, 2020). The final recoverable mass  $m$  (in tonnes/year) was computed as:

$$m = P \times \text{RPR} \times \alpha$$

where  $P$  is the annual crop production (tonnes/year), RPR is the residue-to-product ratio, and  $\alpha = 0.40$  is the assumed availability coefficient.

### Energy Yield Estimation

The energy content of each residue was estimated using the LHV adjusted for moisture content. The values used were based on national laboratory results and consistent with international references. For instance, oil palm fiber (20 % moisture) was assumed to have an LHV of 15.4 MJ/kg, while hard corn stalks (15 %) were assigned 14.8 MJ/kg. Sugarcane bagasse (50 % moisture) and rice husk (10 %) yielded 7.94 MJ/kg and 12.01 MJ/kg, respectively (Instituto Nacional de Preinversión, 2014).

The gross calorific energy  $Q$  (in MJ/year) was then obtained as:

$$Q = m \times \text{LHV}$$

To estimate the energy potentially available as electricity, a conversion efficiency of 25 % was used, consistent with typical biomass combustion systems of medium scale (15–30 MW) (Kumar y cols., 2006). The effective electrical potential (EEP), expressed in kilowatt-hours per year, was calculated as:

$$EEP = Q \times \eta \times 277,778$$

where: -  $\eta = 0.25$  is the conversion efficiency, - 277,778 is the MJ-to-kWh factor (1 kWh = 3.6 MJ).

### Spatial Suitability Analysis Using GIS

The third phase involved the identification of optimal locations for biomass plant installation based on spatial criteria.

A multi-criteria evaluation was conducted using ArcGIS, employing both exclusion and preference factors. Exclusion zones included protected areas, rivers, national roads, and volcanic hazard regions. These areas were masked out of the analysis based on binary raster layers.

Six preference criteria were selected to reflect geographic, logistic, and environmental conditions: (i) effective electrical potential (from the energy model), (ii) distance to primary roadways, (iii) proximity to electrical substations, (iv) slope (percent grade), (v) flood exposure index, and (vi) distance from urban settlements. Each criterion was rasterized and standardized on a scale from 1 (least suitable) to 5 (most suitable).

Weights were assigned to each criterion through expert judgment and reference to prior MCA studies (Morato y cols., 2019; Kumar y cols., 2006). The final suitability index was calculated using weighted linear combination:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_i$$

where: -  $S$  is the overall suitability score, -  $r_i$  is the normalized raster value for criterion  $i$ , -  $w_i$  is the assigned weight (Table 1), -  $\sum w_i = 1$ .

Table 1 summarizes the weights used in the MCA.

**Table 1:** Weights assigned to spatial preference criteria

| Criterion                       | Weight |
|---------------------------------|--------|
| Effective electrical potential  | 0.40   |
| Distance to primary roads       | 0.25   |
| Proximity to substations        | 0.15   |
| Slope                           | 0.08   |
| Flood exposure                  | 0.07   |
| Distance from urban settlements | 0.05   |

The resulting suitability raster was classified into five categories using natural breaks (Jenks), producing a final map used to identify the most appropriate locations for biomass plant development.

## RESULTS

### *Effective Electrical Potential of Agricultural Residues*

The calculated EEP for each crop was derived from the recoverable mass and the LHV, as detailed in the methodology. The crop yielding the highest annual EEP was oil palm, with 1273.55 GWh/year, followed by rice (733.81 GWh/year), sugarcane (220.68 GWh/year), and hard corn (179.64 GWh/year). These estimates were based on an assumed conversion efficiency of 25 % and reflect the moisture-adjusted calorific value of each residue.

The predominance of oil palm is due to the high calorific value of its fibers and to the year-round availability of its residues in the coastal regions of Ecuador. Rice husks also exhibit considerable potential due to their moderate LHV and substantial production volumes in lowland provinces. Table 2 summarizes the annual EEP estimates by crop.

**Table 2:** Effective Electrical Potential by Residue Type

| Crop      | EEP (GWh/year) |
|-----------|----------------|
| Oil palm  | 1273.55        |
| Rice      | 733.81         |
| Sugarcane | 220.68         |
| Hard corn | 179.64         |

### *Geographic Distribution of Biomass Potential*

To assess the spatial distribution of biomass resources across Ecuador, residue generation was first estimated at the crop level. Figure 1 illustrates the distribution of the four selected crops—sugarcane, rice, oil palm, and hard corn—expressed in tonnes per year per province. These maps were developed using georeferenced agricultural production data, which served as the basis for calculating the recoverable biomass by crop.

Using the crop-specific residue-to-product ratios and the assumed availability coefficient, the estimated biomass values were aggregated to construct a composite raster layer representing the total annual biomass availability per province. This aggregation resulted in the total recoverable biomass map shown in Figure 2.

The combined biomass layer was then used to estimate the provincial EEP, which reflects the energy content of the residues potentially convertible into electricity. The EEP map (Figure 3) classifies provinces into five categories using natural breaks (Jenks), allowing the differentiation of provinces based on their energy generation potential. Provinces with extensive oil palm and rice cultivation—particularly Guayas and Los Ríos—stood out due to their concentration of high-yield residues and favorable logistics.

The classification was derived from the natural breaks (Jenks) algorithm, which partitions the data into groups that maximize intra-class similarity and inter-class contrast. Class 1 includes provinces with minimal generation potential, while Class 5 corresponds to territories with the highest concentration of energy-relevant residues. These include Guayas and Los Ríos, where oil palm and rice dominate production patterns and logistical infrastructure is already in place.

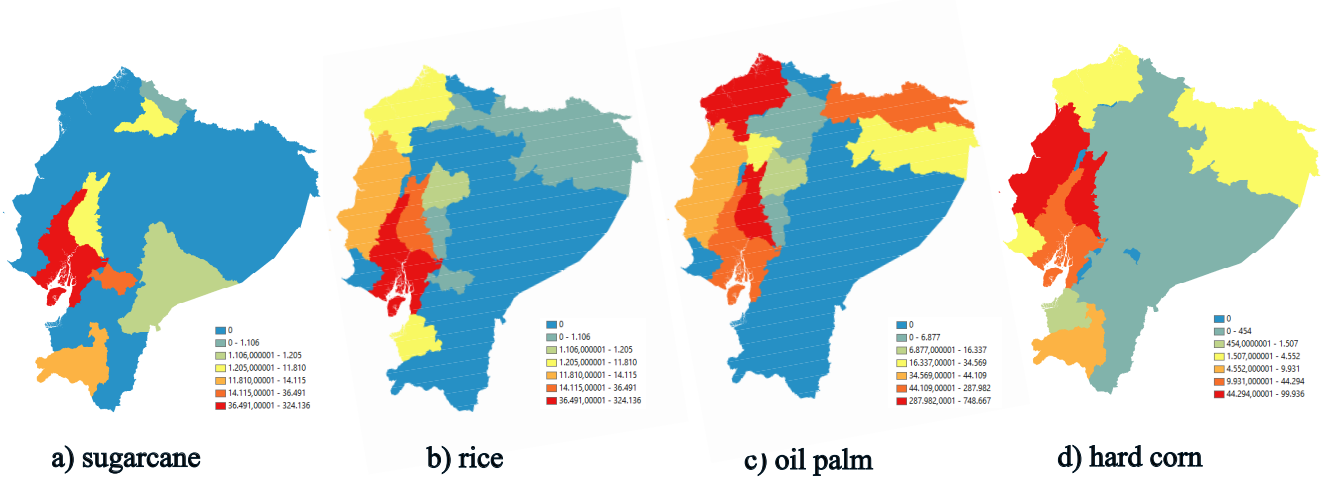
The five provinces with the highest EEP concentrate more than 80 % of the national recoverable biomass. Table 3 presents these provinces along with their estimated annual biomass availability.

**Table 3:** Top Five Provinces by Effective Electrical Potential

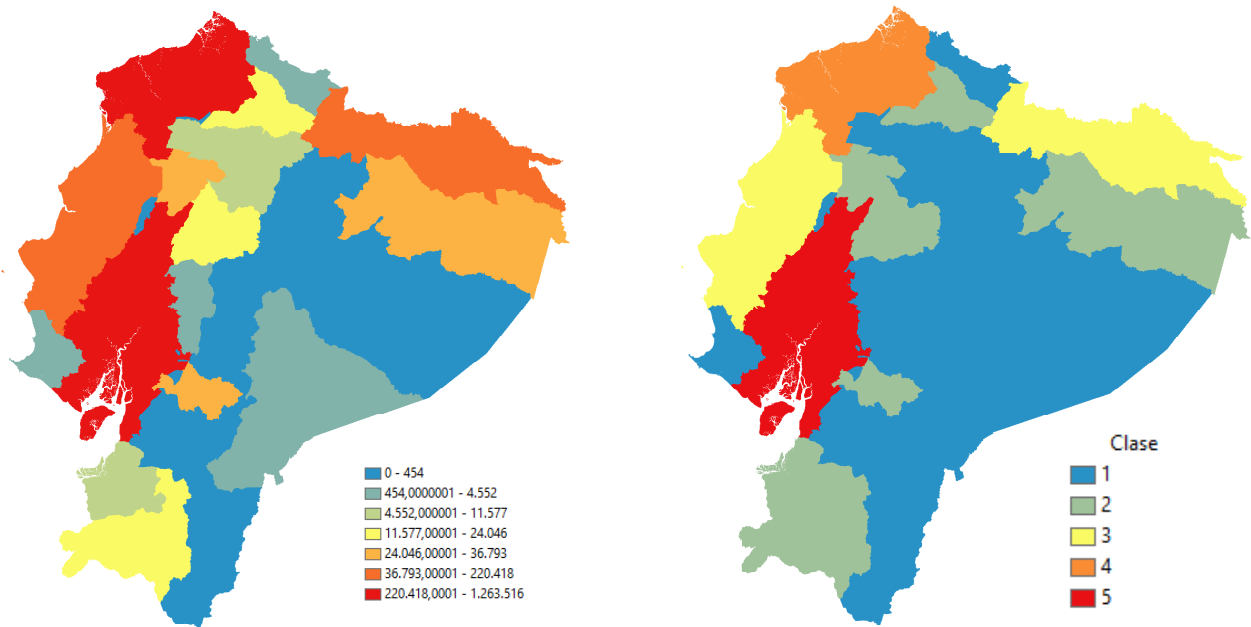
| Province   | EEP (GWh/year) | Available biomass (t/year) |
|------------|----------------|----------------------------|
| Guayas     | 891.09         | 1,263,517                  |
| Los Ríos   | 702.83         | 1,066,434                  |
| Esmeraldas | 438.58         | 720,426                    |
| Sucumbíos  | 133.98         | 220,417                    |
| Manabí     | 124.81         | 174,583                    |

### *Spatial Suitability Analysis*

To determine locations that meet the spatial requirements for biomass plant deployment, a MCA was conducted using GIS-based raster overlay. This process integrated six prefe-



**Fig. 1:** Geographic distribution of main crops in Ecuador by production volume (t/year): a) sugarcane, b) rice, c) oil palm, d) hard corn.



**Fig. 2:** Total estimated recoverable agricultural residues by province (t/year).

rence criteria and three geographic exclusions. Each layer was processed and standardized before being combined into a composite suitability index.

Figure 4 presents the preference layers used in the weighted overlay. These include:

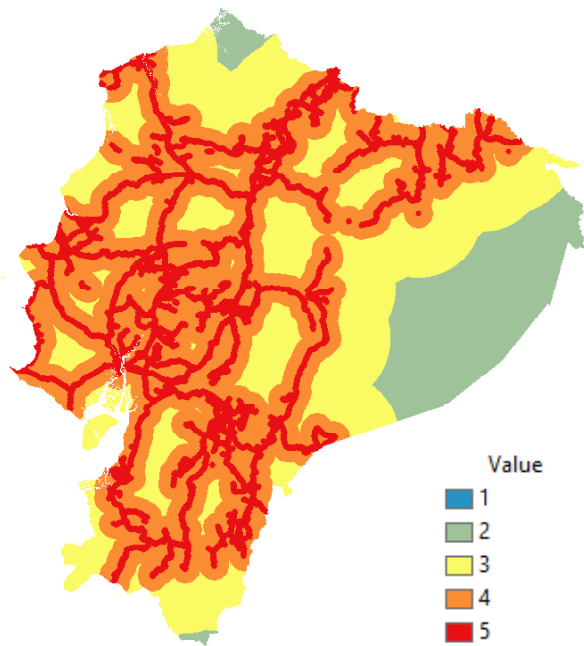
- **Road accessibility:** Euclidean distance to primary and secondary roads.
- **Proximity to settlements:** Calculated as distance from urban areas, favoring intermediate locations for distribution efficiency.
- **Distance to substations:** Derived from geolocated electrical infrastructure datasets.
- **Slope:** Extracted from digital elevation models, with lo-

**Fig. 3:** Provincial classification of effective electrical potential (EEP). The scale includes five classes based on annual generation potential: Class 1 (0–4.42 GWh), Class 2 (4.42–21.02 GWh), Class 3 (21.02–133.98 GWh), Class 4 (133.98–438.57 GWh), and Class 5 (438.57–891.09 GWh).

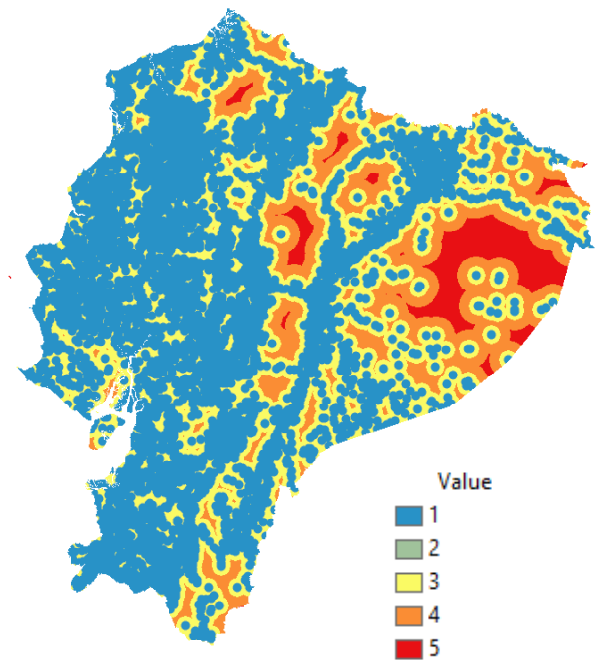
wer gradients preferred to reduce construction complexity.

In parallel, exclusion zones were defined to mask out areas incompatible with biomass infrastructure. These included:

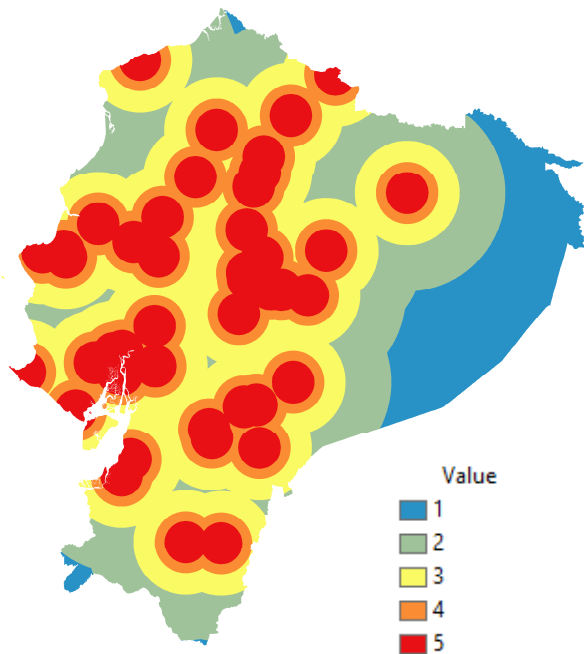
- **Volcanic hazard zones:** Based on official risk zoning maps.
- **Hydrographic basins:** Protected areas surrounding river headwaters.
- **Transport corridors:** Buffers applied to first- and second-order roads to maintain safety distances and preserve transit zones.



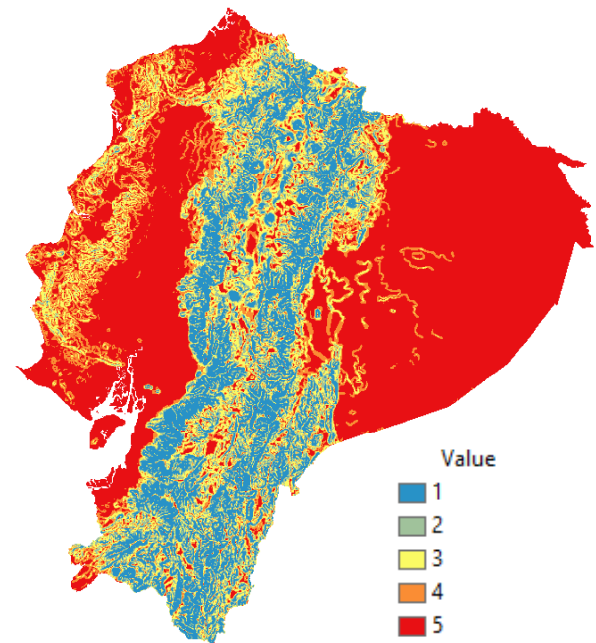
(a) Road accessibility



(b) Proximity to settlements



(c) Distance to substations



(d) Terrain slope

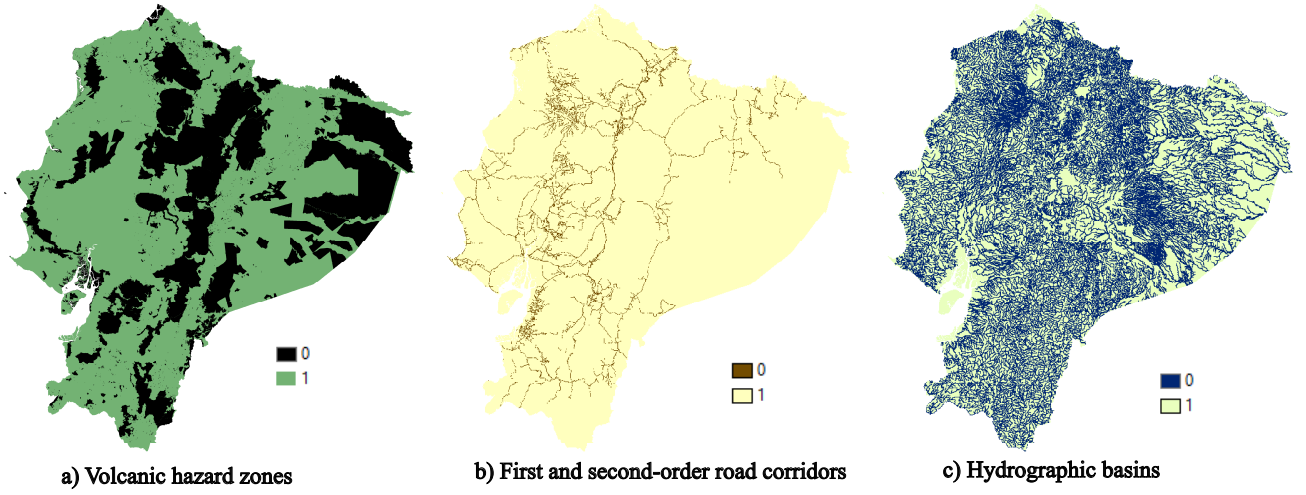
**Fig. 4:** Spatial preference criteria used in the multi-criteria analysis.

Figure 5 shows the geospatial representation of these exclusion factors.

Once standardized and reclassified, the preference layers were weighted according to the scheme in Table 1. The ras-

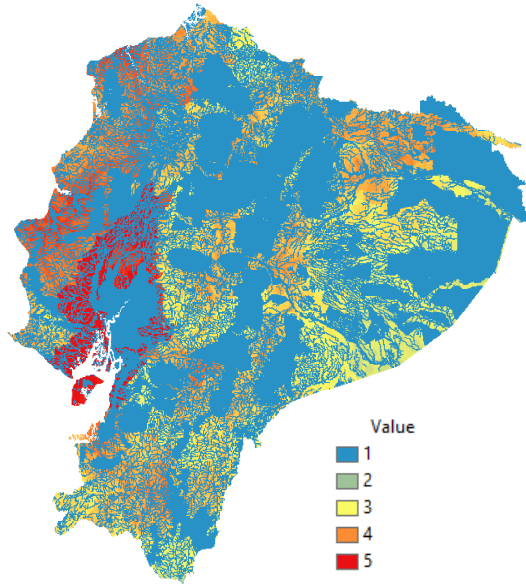
ter overlay was computed through weighted linear combination, and the output classified into five levels using the Jenks natural breaks method.

Figure 6 shows the final suitability map. Areas in Class



**Fig. 5:** Geographic exclusion layers. a) Volcanic hazard zones, b) First and second-order road corridors, c) Hydrographic basins.

5 combine high biomass availability with favorable topography, short distances to key infrastructure, and low exposure to environmental constraints. These locations are predominantly found in coastal provinces, particularly in Guayas and Los Ríos, but also appear in portions of Esmeraldas and Manabí. In contrast, high-residue regions with severe slopes or restricted access ranked lower in the composite index.



**Fig. 6:** Final suitability map for biomass plant siting in Ecuador. Classified into five levels: Class 1 (least suitable) to Class 5 (most suitable).

### Economic Evaluation: LCOE Estimation

To assess the economic feasibility of biomass power generation, the levelized cost of electricity (LCOE) was esti-

mated for a hypothetical 25 MW combustion-based facility. The LCOE represents the average cost per unit of electricity generated over the plant's lifetime and was calculated using the following equation (International Energy Agency (IEA) y OECD Nuclear Energy Agency (NEA), 2020; Short y cols., 2005):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (I_t + O_t + F_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=1}^n E_t / (1+r)^t}$$

where:

- $I_t$  = investment expenditures in year  $t$ ,
- $O_t$  = operation and maintenance costs in year  $t$ ,
- $F_t$  = fuel costs in year  $t$ ,
- $E_t$  = electricity generated in year  $t$ ,
- $r$  = discount rate,
- $n$  = project lifetime in years.

The analysis used the following assumptions:

- Installed capacity: 25 MW
- Capacity factor: 70 %
- Project lifetime: 20 years
- Discount rate: 10 %
- Capital cost: USD 2,200 per kW installed
- Annual O&M costs: 4 % of capital cost
- Fuel cost: USD 8.5 per tonne (agricultural residues)

Based on these parameters, the annual energy generation was estimated at 153.3 GWh/year, and the resulting LCOE was calculated as USD 0.097/kWh. This estimate reflects conservative assumptions adapted to Ecuadorian market conditions. All monetary values are expressed in 2024 USD.

## DISCUSSION

The technical and spatial analysis confirms that residues from Ecuador's agricultural sector have the capacity to support distributed electricity generation through biomass combustion systems. Among the residues evaluated, oil palm fiber stands out due to its combination of thermal properties and continuous generation throughout the year. Rice husks, while seasonal, exhibit sufficient volume and energy content to sustain regional-scale applications, especially when integrated with complementary feedstocks. Although sugarcane bagasse is already used in industrial cogeneration, particularly in sugar mills, its spatial availability is more concentrated and its use for independent biomass facilities may be constrained by industrial self-consumption. Hard corn stalks present lower energy yields per hectare but could support small-scale systems in zones with limited alternative residues.

Geospatial analysis demonstrates that residue density alone is insufficient to guide infrastructure placement. The highest scoring provinces in terms of suitability—Guayas, Los Ríos, and Esmeraldas—combine favorable logistical conditions (access to highways and substations) with topographic stability and minimal environmental exclusion zones. Conversely, provinces with biomass availability but unfavorable terrain or flood exposure (e.g., certain Andean zones) may require additional infrastructure investment or adaptation in plant design.

Crop calendars also influence plant viability. Rice and sugarcane residues are bound to harvesting cycles, resulting in seasonal surpluses. These patterns introduce limitations on year-round operation for plants depending exclusively on these inputs. Oil palm cultivation, largely located in the coastal region, yields residues more steadily across the calendar year, which allows for a more predictable supply stream. Combining residues with differing seasonal profiles may reduce storage requirements and increase operational stability, as previously observed in mixed-feed biomass systems in Colombia and Southeast Asia (Morato y cols., 2019).

Economically, the estimated LCOE for a biomass facility of 25 MW capacity was USD 0.097/kWh. This value reflects the localized cost structure, including fuel collection, labor, transportation, and interconnection. While higher than LCOE benchmarks in countries with large-scale supply chains—such as Brazil (USD 0.06–0.08/kWh)—the estimated value remains competitive in Ecuador's context, where fossil-based electricity still forms part of the dispatch matrix and faces volatility in fuel supply costs (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023).

The development of distributed biomass energy systems in Ecuador may benefit from further regulatory adjustments. Although current legislation recognizes renewable generation under the distributed model, specific incentives for biomass—such as feed-in tariffs, tax exemptions, or concessional financing—remain limited. Encouraging cooperative models involving small producers could increase supply chain reliability and promote inclusive rural development. Moreover, integrating biomass facilities into local development plans would help align infrastructure investment with national electrification and sustainability goals.

In summary, aligning biomass availability with spatial and

technical criteria leads to a more precise identification of viable plant locations. The findings provide a basis for pilot-scale implementation and suggest that regional development strategies can benefit from incorporating biomass energy, particularly in zones with abundant crop residues and logistical connectivity.

## CONCLUSIONS

This study combined energy estimation with spatial modeling to evaluate the suitability of agricultural residues for electricity generation through biomass combustion in Ecuador. The analysis focused on four crop types with established energy potential: oil palm, rice, sugarcane, and hard corn. Together, these residues could yield an estimated annual output of 2407.68 GWh, based on conservative assumptions regarding recoverable biomass and thermal conversion efficiency.

Spatial analysis revealed that provinces such as Guayas, Los Ríos, and Esmeraldas not only concentrate the highest volumes of biomass but also offer geographic and infrastructural conditions compatible with biomass facility deployment. These include relatively flat terrain, access to primary roadways, and proximity to substations. The use of a weighted overlay method within ArcGIS allowed for the integration of energy potential with spatial preference and exclusion layers, resulting in a suitability map that can guide infrastructure planning at the regional scale.

In parallel, a cost analysis estimated the levelized cost of electricity for a 25 MW biomass plant at USD 0.097 per kWh. This value remains within a competitive range for Ecuador's generation mix, especially for decentralized applications where transmission costs and grid extension are limiting factors. The estimate reflects current local conditions, including transportation logistics and fuel availability, and is consistent with values reported in comparable Latin American contexts.

For biomass projects to scale, future planning efforts should focus on regions with predictable feedstock availability and suitable siting conditions. Technical design must account for crop seasonality, which can be mitigated by combining residues with complementary harvest cycles. Beyond technical considerations, institutional frameworks will play a decisive role in advancing project implementation. Supportive measures—such as local incentives, risk-sharing mechanisms, and standardized permitting processes—could encourage private participation and improve deployment timelines.

The methodological framework applied in this study may also be adapted to other regions in Ecuador or countries with similar agricultural profiles, provided that geospatial and production data are available. As part of a broader energy diversification strategy, bioenergy holds promise as a locally sourced and grid-compatible complement to intermittent renewables.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Universidad de Cuenca for providing access to the Microgrid Laboratory at the Faculty of Engineering, where the present research was conducted.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: M.E.V.-I., Y.M.-A. and D.O.-C.; methodology: M.E.V.-I., Y.M.-A. and D.O.-C.; formal analysis: M.E.V.-I., Y.M.-A. and D.O.-C.; investigation: M.E.V.-I., Y.M.-A. and D.O.-C.; resources: D.O.-C.; data curation: Y.M.-A. and M.E.V.-I.; writing — original draft: Y.M.-A. and M.E.V.-I.; writing — review and editing: D.O.-C.; visualization: Y.M.-A. and M.E.V.-I.; supervision: D.O.-C.; project administration: D.O.-C. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

## FUNDING

This research received no external funding.

## REFERENCES

- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCONEL). (2024). *Balance nacional de energía eléctrica*. <https://arconel.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=439&force=1>. (Accessed on May 25, 2025)
- Aydin, N. Y., Kentel, E., y Duzgun, S. (2013). Gis-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western turkey. *Energy Conversion and Management*, 70, 90–106. doi: 10.1016/j.enconman.2013.02.004
- Chamba Quezada, C. D., y Gómez Live, C. F. (2020). *Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica basadas en desechos agrícolas y agroindustriales, reproducibles en distintas localizaciones en ecuador*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21233>. Quito, Ecuador. (Accessed on May 25, 2024)
- Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. doi: 10.1016/S0196-8904(00)00137-0
- Instituto Nacional de Preinversión. (2014). *Atlas bioenergético de la república del ecuador*. Quito. Descargado de <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00194.pdf>
- International Energy Agency (IEA), y OECD Nuclear Energy Agency (NEA). (2020). Projected costs of generating electricity 2020 [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020> (Accessed: 2024-12-15)
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). *Renewable energy market analysis: Latin america*. <https://www.irena.org/Publications/2016/Dec/Renewable-Energy-Market-Analysis-Latin-America>. (Accessed May 2025)
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>. (Accessed on May 25, 2024)
- Kumar, A., Sokhansanj, S., y Flynn, P. C. (2006). Development of a multicriteria assessment model for ranking biomass feedstock collection and transportation systems. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129(1–3), 71–87. doi: 10.1385/ABAB:129:1:71
- Malczewski, J. (1999). *Gis and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- Marín-Apolo, Y. d. C., Vega-Íñiguez, M. E., y Ochoa-Correa, D. (2025). Aprovechamiento de residuos agrícolas para producción de electricidad en latinoamérica: Revisión literaria de casos exitosos en México, Colombia y Brasil. *Revista InGenio*, 8(1), 46–68. Descargado de <https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/ingenio/article/view/901> doi: 10.18779/ingenio.v8i1.901
- Morato, T., Vaezi, M., y Kumar, A. (2019). Developing a framework to optimally locate biomass collection points to improve the biomass-based energy facilities locating procedure – a case study for Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.004>.
- Peláez-Samaniego, M. R., y Espinoza Abad, J. L. (2015). *Energías renovables en el Ecuador: situación actual, tendencias y perspectivas*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Salinas-León, C. D., y Ochoa-Correa, D. (2025). Multi-criteria analysis for the site selection of hydrokinetic turbines-HKT for renewable energy generation: A case study in Ecuador. *Renewable Energies*, 3(1), 1–14. Descargado 2025-05-07, de <https://doi.org/10.1177/27533735251340200> (Publisher: SAGE Publications) doi: 10.1177/27533735251340200
- Serrano, J., Mejía, W., Ortiz, J., Sánchez, A., y Zalamea, S. (2017). *Determinación del potencial de generación eléctrica a partir de biomasa en el Ecuador* (n.º 17). Revista de la Facultad de Ciencias Químicas.
- Short, W., Packey, D. J., y Holt, T. (2005). *A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies* (Inf. Téc. n.º NREL/TP-462-5173). Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Descargado de <https://www.nrel.gov/docs/fy05osti/5173.pdf>
- Zafar, S. (2022). *Biomass energy in developing countries*. [urlhttps://www.bioenergyconsult.com/biomass-energy-in-developing-countries/](https://www.bioenergyconsult.com/biomass-energy-in-developing-countries/). (Accessed May 2025)

# Optimización de diseño de mallas a tierra a través del análisis de la resistividad del suelo: Una investigación integral para el sector de Sangolquí

## *Optimization of the design for ground grid systems through the analysis of soil resistivity: A comprehensive investigation for the sector of Sangolquí*

Flavio Barbosa<sup>1,\*</sup>, Santiago Pérez<sup>1</sup> y Kevin Avilés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera Gestión de mantenimiento y eficiencia Energética, ISTER, Loja, Ecuador, flavio.barbosa@ister.edu.ec, santiago.perez@ister.edu.ec, kevin.aviles@ister.edu.ec

\* Autor para correspondencia: flavio.barbosa@ister.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 11/02/2025    Fecha de aceptación del manuscrito: 21/04/2025    Fecha de publicación: 30/06/2025

**Resumen**—El diseño adecuado de las mallas a tierra es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones eléctricas, especialmente en zonas con alta variabilidad geológica. Este estudio se centra en el análisis y optimización de las mallas a tierra en el sector de Sangolquí, Ecuador, considerando los estándares de las normas IEEE 81 y NEC. Se utilizó el método Wenner (*Alpha*) para medir la resistividad del suelo y se aplicaron técnicas avanzadas para el modelado del terreno y la optimización de diseño. Las mediciones realizadas en sesenta ubicaciones estratégicas reflejan una resistividad del suelo variable entre 45,76  $\Omega\cdot m$  y 109,32  $\Omega\cdot m$ . A partir de estos datos se calcularon configuraciones óptimas de mallas a tierra, logrando reducir la resistencia por debajo de los 25  $\Omega$  requeridos por las normativas internacionales. Además, se evaluaron distintos materiales y configuraciones para optimizar costos y eficiencia. Este trabajo contribuye significativamente a la mejora de la seguridad eléctrica en instalaciones residenciales, proporcionando un enfoque práctico y normativo para el diseño de sistemas de puesta a tierra en regiones con características geológicas diversas.

**Palabras clave**—Mallas de tierra, Resistividad del suelo, Wenner, Optimización, Sangolquí.

**Abstract**—The proper design of grounding systems is essential to ensure the safety and efficiency of electrical installations, especially in areas with high geological variability. This study focuses on the analysis and optimization of grounding systems in the Sangolquí area, Ecuador, considering the standards of IEEE 81 and NEC regulations. The Wenner (*Alpha*) method was used to measure soil resistivity, and advanced techniques were applied for terrain modeling and design optimization. Measurements taken at sixty strategic locations reflect soil resistivity ranging from 45.76  $\Omega\cdot m$  to 109.32  $\Omega\cdot m$ . Based on this data, optimal grounding system configurations were calculated, achieving a resistance below the 25  $\Omega$  required by international standards. Additionally, various materials and configurations were evaluated to optimize costs and efficiency. This work significantly contributes to enhancing electrical safety in residential installations, providing a practical and regulatory approach for the design of grounding systems in regions with diverse geological characteristics.

**Keywords**—Grounding systems, Soil resistivity, Wenner, Optimization, Sangolquí.

## INTRODUCCIÓN

En el diseño de mallas a tierra es un aspecto crucial en la seguridad de instalaciones eléctricas, ya que permite la disipación segura de corrientes de falla y protege tanto a personas como a equipos. La eficiencia de una malla a tierra depende en gran medida de la resistividad del suelo, que varía según factores geológicos, climáticos y estacionales (Salam y cols., 2017; Sazali y cols., 2020). En muchos países en desarrollo, los sistemas de puesta a tierra suelen ser deficientes, lo que representa un riesgo significativo para la seguridad de las instalaciones eléctricas (Oyeyemi y cols., 2022).

La resistividad del suelo desempeña un papel crucial en el diseño de las mallas a tierra, ya que influye directamente

en el dimensionamiento, configuración y eficacia del sistema (Zhou y collaborators, 2017). Una resistividad elevada puede limitar la capacidad de disipación de corrientes de falla al terreno, mientras que suelos de baja resistividad pueden facilitar un diseño más eficiente y económico (Trifunovic y Kostic, 2015).

Este estudio se enfoca en la optimización del diseño de mallas a tierra en Sangolquí, Ecuador, considerando la variabilidad del terreno y la aplicación de las normas IEEE 81 y NEC. Se propone un enfoque basado en el análisis detallado de la resistividad del suelo y en la implementación de estrategias de optimización para mejorar el desempeño de las mallas a tierra. A través de la aplicación del método Wenner (*Alpha*), reconocido por su precisión en la medición de resis-

tividad, se realizaron mediciones en diferentes puntos estratégicos del sector. Este enfoque permitió generar un modelo geoelectricista detallado, considerando variables como la profundidad de las mediciones, el contenido de humedad del suelo y las condiciones climáticas (Abdullah y cols., 2011; Pazha y cols., 2019). Además, se siguieron los lineamientos de la norma IEEE 81, que establece procedimientos estándar para garantizar resultados fiables y replicables.

Sangolquí representa un caso de estudio interesante debido a su ubicación geográfica y la variabilidad en los tipos de suelo que se encuentran en la región. Estas características hacen necesario un análisis detallado para garantizar que las mallas a tierra cumplan con los requerimientos de seguridad eléctrica establecidos por normativas internacionales, como la NEC (Li y cols., 2008). Además, se busca aportar una guía práctica para la mejora de las instalaciones eléctricas residenciales en el país, donde la mayoría de los sistemas actuales no cumplen con los estándares mínimos de seguridad (Senthil-kumar, 2017).

Este trabajo no solo busca optimizar el diseño de las mallas a tierra, sino también contribuir a una mejor comprensión de las interacciones entre las propiedades del suelo y el desempeño de los sistemas de puesta a tierra. Los resultados de esta investigación tienen el potencial de ser aplicados a nivel nacional y en otras regiones con características geológicas y climáticas similares, promoviendo así la adopción de prácticas seguras y eficientes en el diseño de instalaciones eléctricas (Yang y collaborators, 2001).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas se llevaron a cabo en el sector de Sangolquí, Ecuador. Las mediciones fueron definidas considerando la altitud sobre el nivel del mar (msnm) y la geografía del área de estudio. Se utilizó los siguientes materiales detallados en la tabla 1 (Sazali y cols., 2020).

**Tabla 1:** Detalles de materiales utilizados

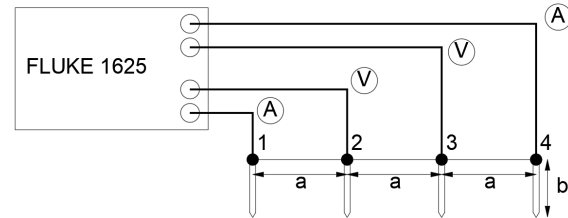
| Material                    | Descripción                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Telurómetro                 | Se utilizó el comprobador de puesta a tierra 1625-2 GEO de Fluke.                                                                                                                        |
| Electrodos picas de pruebas | Se utilizaron cuatro varillas metálicas de acero galvanizado de 30 cm de longitud.                                                                                                       |
| Cables de conexión          | Cables eléctricos con los debidos terminales tanto para conexión con el telurómetro como para los electrodos de prueba. El equipo cuenta con cuatro carretes de 60 m, 40 m, 30 m y 20 m. |

Entre los métodos más empleados para el análisis de la resistividad del suelo se encuentran los siguientes métodos detallados con sus ventajas y desventajas en la tabla 2 (Oye-yemi y cols., 2022).

Para el estudio se utilizó el método Wenner (Alpha), también conocido como Wenner de cuatro polos, debido a la simplicidad de la configuración, facilidad de interpretación de los resultados, la resolución para variaciones de resistividad y poseer una mayor sensibilidad a los cambios del terreno. El procedimiento empleado sigue los lineamientos de la norma IEEE 81, que establece los criterios para la medición de la resistividad del suelo y el diseño de sistemas de puesta a

tierra. Se detallan los pasos seguidos para la medición de resistividad y el cálculo de la configuración óptima de la malla a tierra en la tabla 3.

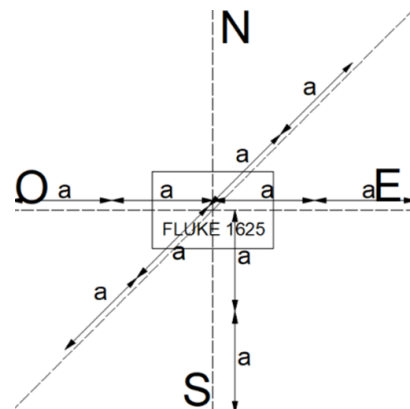
La disposición de los electrodos con el método designado emplea un esquema de conexión utilizando cuatro electrodos en una configuración sencilla de realizar y modificar, junto con el equipo utilizado para las mediciones (Salam y cols., 2017). Esta configuración se ilustra en la figura 1.



**Fig. 1:** Método de conexión para la medición de la resistividad del suelo.

Para las mediciones se utilizaron cuatro electrodos de prueba de 0.3 m de longitud, insertados verticalmente a una distancia equidistante entre ellos. Se definió como  $b$  la longitud de cada varilla y como  $a$  la separación entre las varillas de prueba (Abdullah y cols., 2011). La metodología incluyó mediciones en direcciones norte-sur, este-oeste y diagonal. Las distancias de prueba ( $a$ ) fueron de 4, 6 y 10 m. Se empleó el telurómetro Fluke 1625-2 para inyectar corriente entre las varillas de prueba 1 y 4. La diferencia de potencial se midió entre las dos varillas internas (2 y 3), como se indica en la figura 1, dado que el telurómetro emplea estos valores para calcular la resistencia de la tierra.

Las mediciones se realizaron conforme a la normativa IEEE 81, la cual establece los procedimientos adecuados para determinar la resistividad del suelo. La metodología seguida se ilustra en la figura 2 (Zhou y collaborators, 2017).



**Fig. 2:** Mediciones de resistencia del terreno.

Las mediciones se realizaron en tres direcciones: norte-sur, este-oeste y en diagonal. En cada caso, los valores de  $a$  fueron de 4, 6 y 10 m, permitiendo obtener un total de nueve mediciones por punto de muestreo (Trifunovic y Kostic, 2015).

Se recopilaron datos de resistencia y resistividad del terreno en el sector de Sangolquí, Ecuador ( $-0,33405, -78,45217$ ). Se seleccionaron sesenta ubicaciones estratégicas, tomando en consideración el tipo de suelo determinado por el mapa geológico del Ecuador, datos del

**Tabla 2:** Comparación entre métodos para la medición de resistividad del suelo

| Método            | Ventajas                                                                                                             | Desventajas                                                                                                        |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schlumberger      | Fácil instalación, requiere menor cantidad de conductor al mover los electrodos de corriente.                        | Da una sensibilidad menor a variaciones locales y cuenta con una interpretación más compleja.                      |
| Half–Schlumberger | Utiliza menos cantidad de conductor que el método de Schlumberger completo; es más efectivo en terrenos irregulares. | La precisión en la medición es menor que el método completo.                                                       |
| Wenner (Alpha)    | Fácil instalación y método de cálculo; se logra una alta sensibilidad a posibles cambios de resistividad.            | Se requiere un mayor espacio para poder realizar mediciones a mayor profundidad.                                   |
| Wenner (Beta)     | Se adapta mejor a terrenos con geometría irregular, con una instalación similar al Wenner (Alpha).                   | Más complejo que Wenner (Alpha) por la configuración de las picas; menor uso dentro de las normativas estándar.    |
| Pole–Pole         | Mayor profundidad de medición con menos espacio.                                                                     | Posee una alta influencia a los efectos de borde y alta probabilidad de ruido por objetos metálicos en el terreno. |

**Tabla 3:** Procedimiento para la medición del terreno

| Pasos                               | Descripción                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Preparación del sitio               | Se debe seleccionar un área representativa, evitando cualquier interferencia del sector y asegurar condiciones naturales del suelo.                                |
| Disposición de electrodos de prueba | Se colocan los electrodos en línea recta con una separación equidistante ( $a$ ); el valor de $a$ fue 4, 8 y 10 m para obtener una profundidad adecuada del suelo. |
| Conexión del equipo de medición     | Se aplica una corriente a una frecuencia de 111 Hz con un voltaje de 42 V. Este paso se realiza para cada una de las distancias y direcciones de $a$ .             |
| Cálculo de la resistividad          | Se aplica la ecuación de Wenner para obtener la resistividad aparente, junto con el descarte de datos aplicando Gauss.                                             |
| Análisis de resultados              | Se repiten las mediciones con los valores de 4 m, 8 m y 10 m, se grafican los resultados y se analiza la estratificación del suelo.                                |
| Registro de datos                   | Se registran las condiciones ambientales, ubicación y se presentan valores obtenidos con una interpretación.                                                       |

Instituto Geográfico Militar y la altura sobre el nivel del mar. La tabla 4 resume el número de lugares considerados en función del intervalo de alturas.

**Tabla 4:** Número de datos según la altura sobre el nivel del mar

| No. | Rango mínimo [msnm] | Rango máximo [msnm] | Número de lugares |
|-----|---------------------|---------------------|-------------------|
| 1   | 2463                | 2481                | 1                 |
| 2   | 2481                | 2500                | 9                 |
| 3   | 2500                | 2529                | 11                |
| 4   | 2519                | 2538                | 11                |
| 5   | 2538                | 2557                | 9                 |
| 6   | 2557                | 2575                | 8                 |
| 7   | 2575                | 2594                | 4                 |
| 8   | 2594                | 2613                | 5                 |
| 9   | 2613                | 2632                | 2                 |

Los puntos de medición se ilustran en la figura 3. Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados siguiendo un algoritmo específico para su análisis y tratamiento, como se muestra en la figura 4.

Se evaluaron diferentes configuraciones de mallas considerando la distribución de electrodos y conexiones, los tipos de materiales conductores de cobre y la profundidad y separación óptima de electrodos. El objetivo de la optimización fue minimizar la resistencia de la malla sin incrementar costos excesivamente.

## RESULTADOS

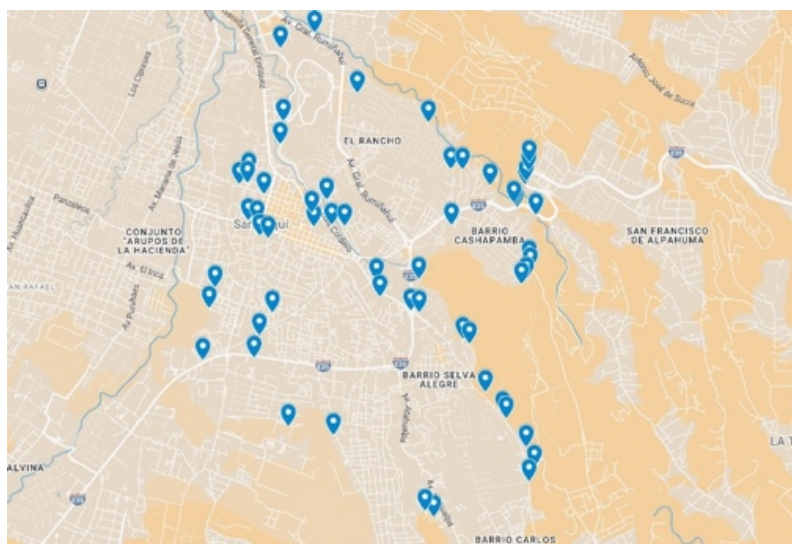
La medición de la resistencia del terreno es una práctica no destructiva. Los métodos empleados son sencillos y ampliamente utilizados, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones. La incorporación de la tomografía en el análisis de la resistividad eléctrica permite obtener características del suelo de manera más rápida y precisa en términos de profundidad y distancia (Ho, 2008).

El modelo de resistividad aparente actual se basa en relaciones empíricas para estimar el perfil de resistividad en función de la profundidad. Sin embargo, estas relaciones pueden presentar imprecisiones debido a factores como la variabilidad del suelo, el contenido de humedad, la temperatura y otros parámetros geológicos. Además, los resultados pueden fluctuar en función de la distancia horizontal, lo que puede comprometer la exactitud de las mediciones, especialmente en suelos superficiales (Abdullah y cols., 2011).

La influencia de la variabilidad del suelo, el contenido de humedad, la temperatura y otros parámetros geológicos sigue siendo un desafío en la obtención de mediciones precisas. Estas limitaciones deben considerarse al interpretar los datos de resistividad del terreno, ya que pueden afectar significativamente la confiabilidad de los resultados obtenidos (Senthilkumar, 2017).

Para el cálculo de la resistividad del terreno se empleó la ecuación (Yang y collaborators, 2001):

$$\rho = 2\pi aR, \quad (1)$$



**Fig. 3:** Puntos de medición en el sector de Sangolquí.

donde  $\rho$  es la resistividad del terreno [ $\Omega \cdot m$ ],  $a$  la distancia de separación entre las picas de prueba [m] y  $R$  la resistencia del terreno [ $\Omega$ ] obtenida mediante el telurómetro.

Los datos provienen de las sesenta ubicaciones mostradas en la figura 3; sin embargo, se presentan únicamente los puntos representativos de las áreas más densamente pobladas, ya que en estas ubicaciones se reflejan de manera más concisa las condiciones generales del sector y permiten una mejor evaluación del comportamiento de las diferentes configuraciones de los sistemas de puesta a tierra. La tabla 5 resume estos datos.

Los valores obtenidos mostraron una gran variabilidad, con resistividades entre  $45.76 \Omega \cdot m$  y  $109.32 \Omega \cdot m$ , lo que confirma la necesidad de un diseño adaptable según la zona. Se presentan los datos obtenidos y su comparación con estudios previos y estándares internacionales.

El diseño de la malla de tierra se enfoca en alcanzar una resistencia inferior a  $25 \Omega$ , conforme a los requisitos establecidos por la NEC. Para ello se emplean las ecuaciones definidas en la norma IEEE 81, las cuales permiten una correcta configuración y dimensionamiento de la malla de tierra (De Electricidad Evaluación y cols., 2023). Se consideró el uso de un cable desnudo de cobre #2 AWG para el diseño de la malla a tierra y una corriente de corto circuito de 10 kA, dado que es la capacidad máxima que puede soportar un interruptor termomagnético residencial, según normativas vigentes.

Las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de diferentes configuraciones de mallas se resumen en la tabla 6. En cada caso, se emplearon imágenes ilustrativas de las configuraciones para facilitar la interpretación.

Donde  $\rho$  es la resistividad del terreno [ $\Omega \cdot m$ ],  $a$  el radio de la varilla [m],  $L$  la longitud de la varilla [m],  $S$  la separación entre las varillas [m] y  $R$  la resistencia de la malla [ $\Omega$ ].

A continuación, se muestra en la figura 5 la variación de la resistencia de puesta a tierra calculada en los distintos puntos del sector de Sangolquí. Este gráfico refleja cómo la resistencia del suelo y las características de las diferentes configuraciones del sistema de puesta a tierra afectan a la eficiencia de la resistencia.

Se realizaron simulaciones y análisis de configuraciones de mallas utilizando las ecuaciones establecidas en la norma

IEEE 81. Los resultados indican que la configuración de dos varillas de 1.8 m, separadas por 2 m, es suficiente para cumplir con la resistencia máxima permitida de  $25 \Omega$  en el 90 % de los casos evaluados.

La validación del sistema de puesta a tierra se logra al demostrar que en las configuraciones presentadas el valor del GPR se mantiene por debajo del voltaje de paso, cumpliendo de esta manera con los criterios de seguridad establecidos según la normativa de la IEEE Std 80 (of Electrical y Engineers, 2013). Se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$\text{GPR} = I_G R_g, \quad (2)$$

$$I_b = \frac{0,166}{\sqrt{t_s}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{touch}} = I_b(R_b + 1,5\rho), \quad (4)$$

$$E_{\text{step}} = I_b(R_b + 6\rho), \quad (5)$$

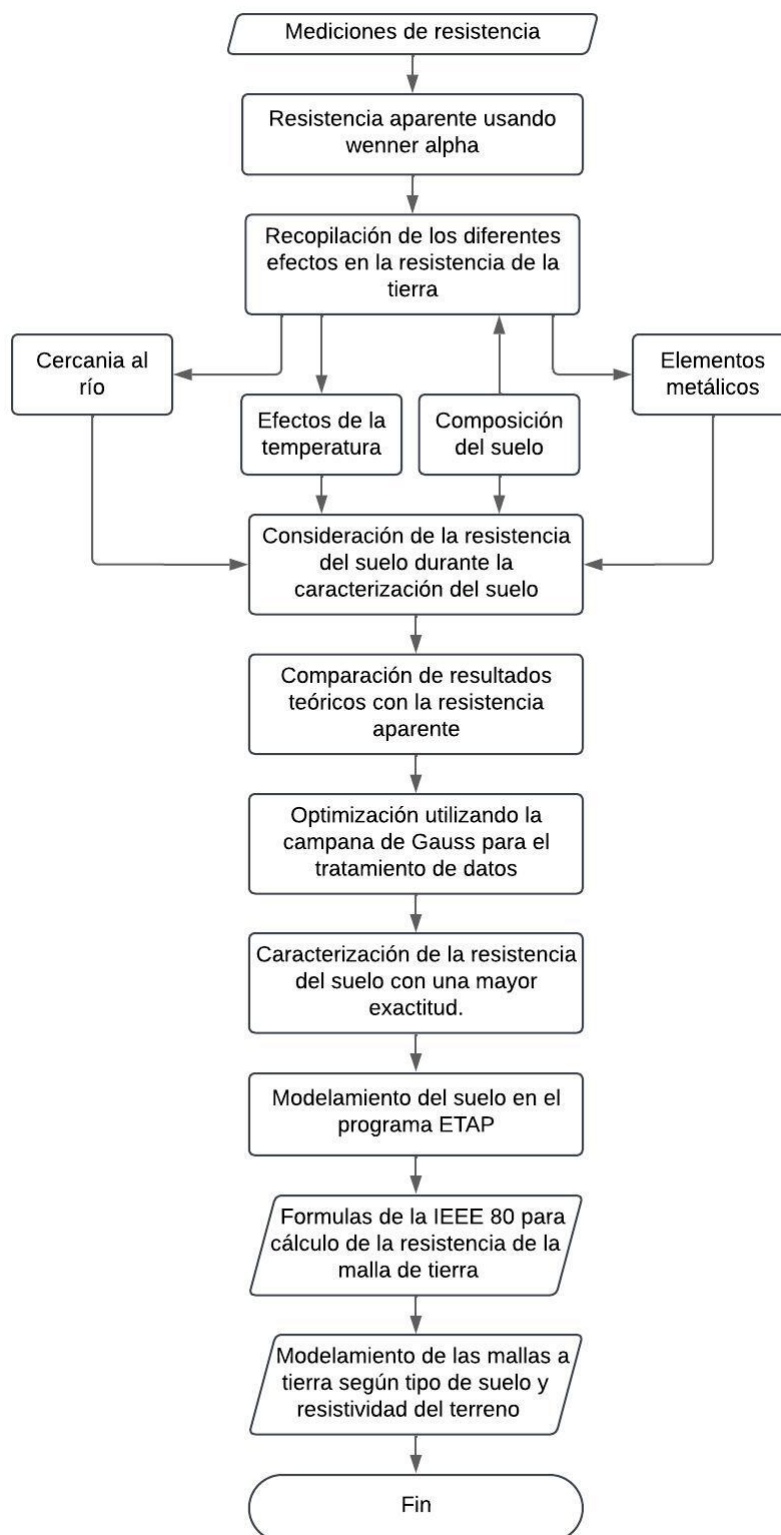
donde  $I_G$  es la corriente de falla a tierra (10 kA),  $R_g$  la resistencia de la puesta a tierra [ $\Omega$ ],  $I_b$  la corriente de falla por el cuerpo humano para una persona de 50 kg,  $t_s$  el tiempo de duración de la falla (0.5 s),  $R_b$  la resistencia del cuerpo humano (1000  $\Omega$ ),  $\rho$  la resistividad del terreno [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],  $E_{\text{touch}}$  el voltaje de toque y  $E_{\text{step}}$  el voltaje de paso.

En las figuras 6–9 se presentan los resultados obtenidos a partir de los modelos de puesta a tierra. Las figuras muestran las variaciones que se encuentran dentro del GPR en relación con los voltajes de paso y de toque, destacando las diferencias entre los modelos propuestos.

## DISCUSIÓN

Dentro del estudio de las mallas de puesta a tierra desarrollado en este documento se logró determinar la resistividad del suelo en el sector de Sangolquí y, como resultado, la resistencia de la malla de puesta a tierra de acuerdo con el número y configuración de las varillas, enfocado en el sector residencial.

Según la normativa del NEC, la IEEE Std 80 especifica que para el sector residencial la resistencia máxima debe ser de  $25 \Omega$ , y para el sector de Sangolquí en un 90 % de los casos se logra con la instalación de dos varillas de *copperweld* de



**Fig. 4:** Algoritmo para el modelado del suelo y mallas a tierra.

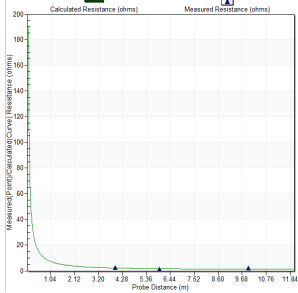
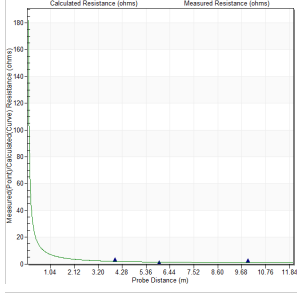
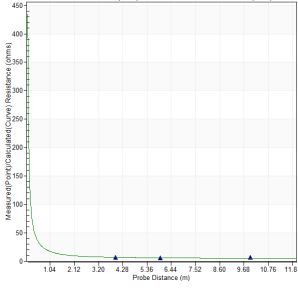
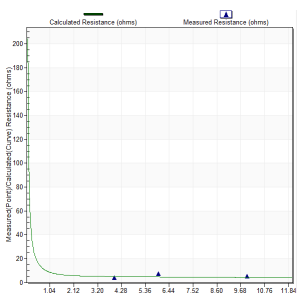
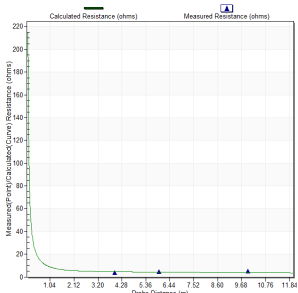
1.8 m, 5/8 pulgadas de diámetro y una separación entre sí de 2 m, proporcionando una solución adecuada para construcciones de viviendas y garantizando una correcta instalación de los sistemas de puesta a tierra.

Para la verificación de las soluciones propuestas se realizó el cálculo de un escenario de accidente mediante circuitos equivalentes, en donde se consideró el voltaje de toque y de paso mayor al GPR, tomando como referencia a una persona

de 50 kg. Dado que el estudio está enfocado al área residencial, se contempló la presencia de niños dentro de las instalaciones eléctricas que pueden hacer contacto con elementos eléctricos conectados a tierra.

Se evaluó el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en diferentes configuraciones mediante el análisis del GPR, voltaje de toque y de paso, comparando tres escenarios. Los resultados muestran que la configuración de una

**Tabla 5:** Datos de la resistividad de los terrenos objetivos en Sangolquí

| Punto de medición                   | Gráfico resistencia vs distancia                                                    | Resistividad<br>[ $\Omega \cdot m$ ] | Coordenadas decimales | Altura [m] | Profundidad<br>[m] |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------|--------------------|
| Parque Turismo                      |    | 47.83                                | -0,32693, -78,45074   | 2500       | 4.95               |
| Parque San Sebastián                |    | 45.76                                | -0,33058, -78,44515   | 2517       | 8.038              |
| Complejo turístico La Cascada       |   | 109.32                               | -0,34314, -78,42846   | 2568       | 3.055              |
| Quinta Lomalta                      |  | 51.30                                | -0,36308, -78,43173   | 2645       | 2.015              |
| Centros Médicos Cruz Roja Sangolquí |  | 53.86                                | -0,33187, -78,45026   | 2502       | 2.266              |

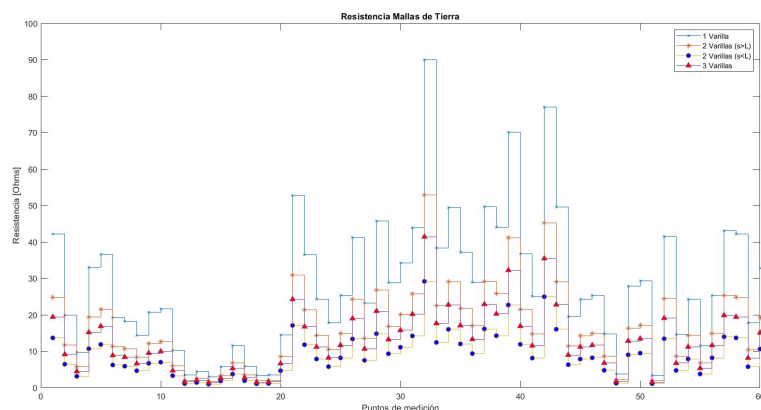
sola varilla presenta el mayor valor de GPR, logrando alcanzar valores de hasta 500 V en algunos puntos de medición. Esto representa un riesgo considerable en los sectores residenciales, donde se pueden producir accidentes por contacto directo con elementos eléctricos; además, en algunos casos los voltajes de paso muestran valores cercanos a los 300 V,

lo cual excede los límites de seguridad establecidos según la normativa de la IEEE Std 80.

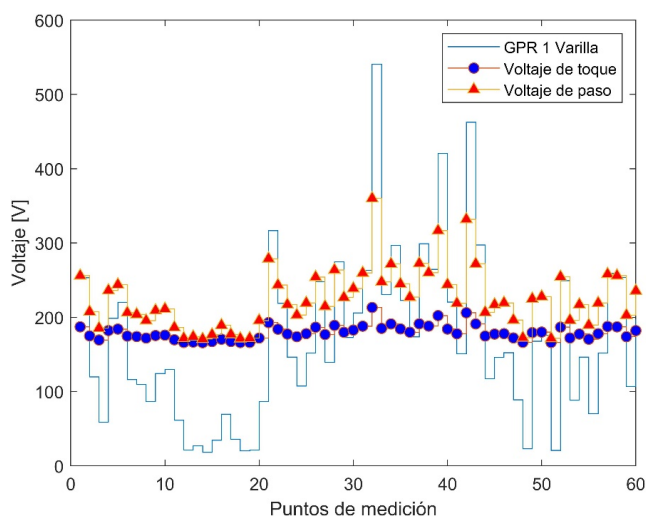
Al aumentar el número de electrodos a dos varillas con una separación menor que la longitud de la varilla se observa una reducción significativa del GPR, con valores inferiores a 150 V, lo que muestra una mejora en la eficiencia de la

**Tabla 6:** Ecuaciones para el cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra

| Tipo | Nombre                              | Fórmula                                                                                                                                                  |
|------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | Una varilla                         | $R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$                                                                                            |
|      | Dos varillas ( $S > L$ )            | $R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left( 1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \right)$              |
|      | Dos varillas ( $S < L$ )            | $R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \right)$                 |
|      | Tres varillas en forma de triángulo | $R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{S} + 1,071 - 0,209 \frac{S}{L} + 0,238 \frac{S^2}{L^2} - 0,054 \frac{S^4}{L^4} \right)$ |



**Fig. 5:** Resistencia de las mallas a tierra.



**Fig. 6:** Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con una varilla de puesta a tierra.

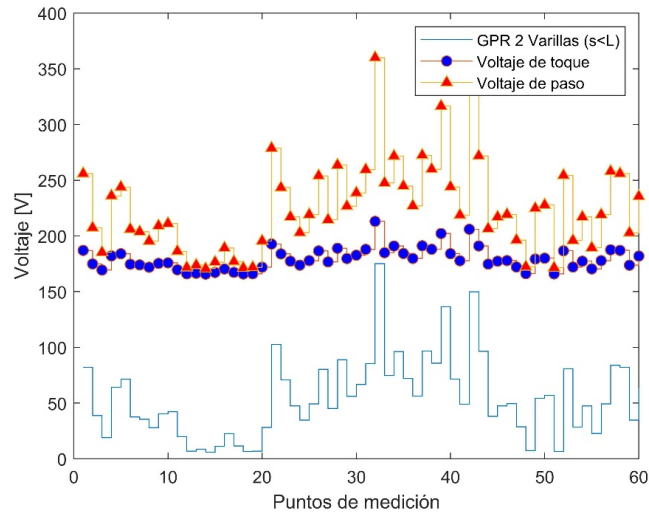
disipación de la corriente de falla. Aunque los voltajes de paso y pico presentan en algunos puntos valores elevados, la disminución del GPR contribuye a una reducción importante del riesgo general en una instalación residencial.

De igual manera, analizando la configuración con dos varillas pero con una distancia de separación mayor a la longitud de la varilla, se observa una reducción del GPR similar a la configuración anterior, aunque con valores alrededor de 250 V en contraste con los 150 V obtenidos anteriormente. No obstante, estos valores se mantienen dentro de los límites

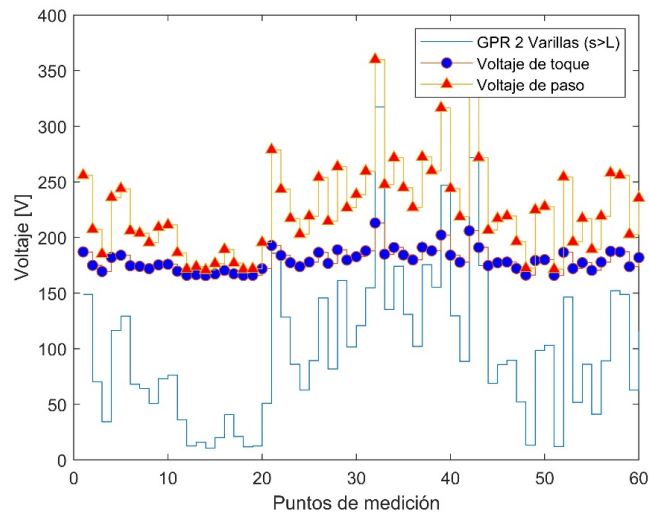
que establece la normativa vigente.

La mejor respuesta del sistema se presenta con la configuración de tres varillas, en donde el GPR no supera los 100 V en la mayoría de los puntos y tanto los voltajes de paso como de toque son mucho más estables y uniformes en los diferentes puntos. Esta configuración permite una mejor distribución del potencial eléctrico del terreno, lo que implica una mejora sustancial en la seguridad de los sistemas de puesta a tierra.

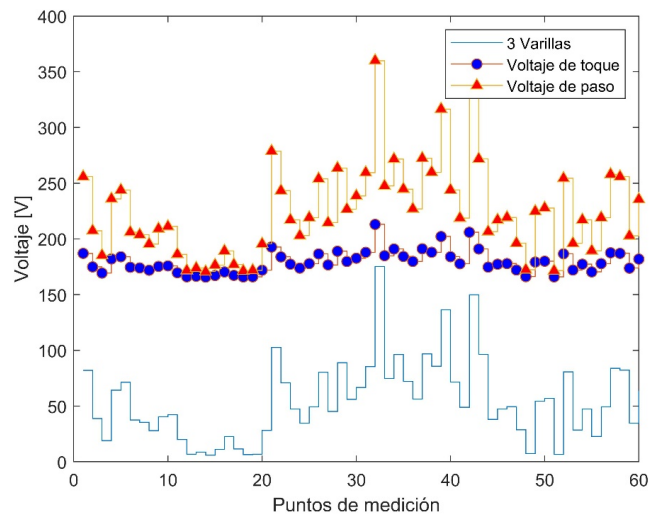
Se destaca que en las configuraciones presentadas los voltajes de toque y de paso se mantienen en niveles relativa-



**Fig. 7:** Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con dos varillas de puesta a tierra ( $S < L$ ).



**Fig. 8:** Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con dos varillas de puesta a tierra ( $S > L$ ).



**Fig. 9:** Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con tres varillas de puesta a tierra.

mente estables y por debajo del GPR, lo que indica que los factores de seguridad frente a un contacto directo se han considerado adecuadamente en los diseños analizados.

## CONCLUSIONES

El presente estudio sobre la optimización del diseño de mallas a tierra mediante el análisis de la resistividad del suelo en Sangolquí permite destacar la importancia de considerar las variaciones geológicas y climáticas en la implementación de sistemas de puesta a tierra. Los resultados obtenidos evidencian que la resistividad del suelo en la región presenta valores altamente variables, lo que subraya la necesidad de un diseño personalizado de las mallas de tierra para garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones eléctricas.

La aplicación del método Wenner (Alpha) permitió obtener mediciones precisas que facilitaron el modelado del comportamiento del terreno. A partir de estos datos se logró diseñar mallas a tierra que cumplen con los estándares internacionales, asegurando una resistencia menor a los 25  $\Omega$ , conforme a la normativa NEC e IEEE 81.

Además, se destaca la importancia de la correcta selección de materiales y configuraciones para reducir costos y optimizar el desempeño del sistema de puesta a tierra. Se recomienda la aplicación de estas metodologías en otras regiones con condiciones geológicas similares para mejorar la seguridad eléctrica en instalaciones residenciales e industriales.

Finalmente, el estudio enfatiza la necesidad de actualizar y reforzar las normativas locales sobre sistemas de puesta a tierra, promoviendo la adopción de técnicas de medición y diseño más precisas para garantizar instalaciones eléctricas seguras y eficientes a nivel nacional.

El incremento de varillas de puesta a tierra permite una mejora significativa en la seguridad del sistema eléctrico. El diseño con tres varillas representa la mejor alternativa evaluada, ya que minimiza el GPR y estabiliza de mejor manera los voltajes de paso y toque en las diferentes zonas, resultando lo más adecuado para instalaciones residenciales con presencia de personas vulnerables como niños y ancianos.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a los docentes del Instituto Superior Rumiñahui, así como a un estudiante cuyo apoyo fue fundamental.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: FB; metodología: FB y SP; análisis formal: FB; investigación: FB y SP; recursos: FB y SP; recopilación de datos: SP y KA; redacción — preparación del borrador original: FB y SP; redacción — revisión y edición: FB y SP; visualización: FB; supervisión: FB y SP; administración de proyecto: FB; adquisición de financiamiento para la investigación: FB. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Flavio Barbosa: FB. Santiago Pérez: SP. Kevin Avilés: KA.

## FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por el Instituto Superior Rumiñahui, bajo resolución ISUISTER-INV-PRO-C-000059.

## REFERENCIAS

- Abdullah, N., Marican, A. M. A., Osman, M., y Rahman, N. A. A. (2011). Case study on impact of seasonal variations of soil resistivities on substation grounding systems safety in tropical country. En *7th asia-pacific international conference on lightning* (pp. 150–154). doi: 10.1109/APL.2011.6111092
- De Electricidad Evaluación, C., Método De Wenner, D., Schlumberger, Y., De Ejecución, T., Eficacia, Y., y Su, E. N. (2023). *Universidad politécnica salesiana sede quito*. Report. (Available from the Universidad Politécnica Salesiana)
- Ho, V. N. C. (2008). Formulas for calculating physical grounding resistance of grounding wire – electric pole system of high voltage transmission lines. En *Joint international conference on power system technology and ieee power india conference* (pp. 1–6). doi: 10.1109/ICPST.2008.4745197
- Li, J., Jin, W., Jin, Z., y Wang, F. (2008). Study on measuring the grounding resistance of grounding grid with short lead wire. En *China international conference on electricity distribution* (pp. 1–4). doi: 10.1109/CICED.2008.5211767
- of Electrical, I., y Engineers, E. (2013). *Ieee guide for safety in ac substation grounding (ieee std 80-2013)*. Standard. (ANSI/IEEE Std 80-2013)
- Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P., Metwaly, M., Omobulejo, O., Sanuade, O. A., y Okon, E. E. (2022). Assessing the suitable electrical resistivity arrays for characterization of basement aquifers using numerical modeling. *Heliyon*, 8(5), e09427. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09427
- Pazha, H., Muhammad, F. H., Agustina, R. D., y Wiratama, R. (2019). The identification of hard bottom surface structure using correlation of geoelectrical resistivity methods and spt data as preliminary studies for laying the foundation at passing cross sumatera toll road, south lampung station. En *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1155, p. 012007). doi: 10.1088/1742-6596/1155/1/012007
- Salam, M. A., Rahman, Q. M., Ang, S. P., y Wen, F. (2017). Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(2), 290–297. doi: 10.1007/s40565-015-0153-8
- Sazali, M. S., Wooi, C. L., Arshad, S. N. M., Wong, T. S., Abdul-Malek, Z., y Nabipour-Afrouzi, H. (2020). Study of soil resistivity using wenner four pin method: Case study. En *Ieee international conference on power and energy (pecon 2020)* (pp. 386–391). doi: 10.1109/PECon48942.2020.9314400
- Senthilkumar, R. T. (2017). Optimization of soil parameters in multiple layers of ground structure. En *Ieee pes asia-pacific power and energy engineering conference (ap-pec)* (pp. 1–5). doi: 10.1109/APPEEC.2017.8308979
- Trifunovic, J., y Kostic, M. (2015). An algorithm for estimating the grounding resistance of complex grounding systems including contact resistance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5167–5174. doi: 10.1109/TIA.2015.2429644
- Yang, Y., y collaborators. (2001). *Grounding system design and analysis*. Technical report. (Datos no disponibles; citado como Yang et al., 2001)
- Zhou, Y., y collaborators. (2017). *Procedures for measuring soil resistivity and designing grounding systems*. Technical report. (Referenciado como Zhou et al., 2017 en el manuscrito)

# Estudio químico-mineralógico de una antigua escombrera del área minera de Barruecopardo (Salamanca): Implicaciones medioambientales

## *Chemical-mineralogical study of an old dump in the mining area of Barruecopardo (Salamanca): Environmental implications*

Oscar Estrella<sup>1,\*</sup>, Ascensión Murciego Murciego<sup>2</sup> y Esther Alvarez Ayuzo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador, oaestrella@unl.edu.ec

<sup>2</sup> Universidad de Salamanca, Salamanca, España

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agro Biología de Salamanca, Salamanca, España

\* Autor para correspondencia: oaestrella@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 23/03/2025

Fecha de aceptación del manuscrito: 01/06/2025

Fecha de publicación: 30/06/2025

**Resumen**—Las antiguas explotaciones de yacimientos minerales con presencia de sulfuros han generado residuos expuestos a los agentes atmosféricos, provocando la oxidación de los sulfuros con el riesgo de producción de acidez y liberación de elementos potencialmente tóxicos. Se llevó a cabo el estudio de residuos de grano fino en una escombrera de la mina de Barruecopardo que explota el principal yacimiento de wolframio de España donde existe importante presencia de arsenopirita y pirita. El principal objetivo fue realizar su caracterización química – mineralógica y determinar los riesgos ambientales de movilización del arsénico. Para ello se emplearon técnicas de difracción de rayos X, microscopía de la luz polarizada y microsonda electrónica. Los riesgos ambientales se establecieron mediante la determinación del pH y potencial de neutralización neto sumado a ensayos de lixiviación y movilidad. El estudio mineralógico identificó como principales fases al cuarzo, moscovita, microclina, albita y caolinita junto con diferentes productos de oxidación de sulfuros y productos de precipitación/disolución en drenajes ácidos de minas: (oxihidr)óxidos AFAs, jarosita y azufre nativo. Los análisis químico – mineralógicos establecieron que los principales portadores de arsénico son (oxihidr)óxidos de hierro, AFAs y jarosita. La caracterización ambiental determinó que los residuos presentan un pH típico de materiales generadores de acidez. Existe un riesgo de movilización de arsénico (55.4 %) si tienen lugar cambios ambientales bajo condiciones reductoras. La movilización de arsénico en condiciones de lixiviación a medio/largo plazo (10 años) se produce de forma continua (4.8 mg/kg). Durante este periodo tiene lugar la disolución de jarosita y la neoformación de (oxihidr)óxidos de hierro.

**Palabras clave**—Lixiviación, Escombrera, Arsénico, (oxihidr)óxidos de hierro, AFAs.

**Abstract**—The old exploitations of mineral deposits with the presence of sulfides have generated waste exposed to atmospheric agents, causing the oxidation of sulfides with the risk of producing acidity and releasing potentially toxic elements. The study of fine-grained residues was carried out in a dump of the Barruecopardo mine that exploited the main tungsten deposit in Spain where there was a significant presence of arsenopyrite and pyrite. The main objective was to carry out its chemical-mineralogical characterization and determine the environmental risks of arsenic mobilization. For this, X-ray diffraction, polarizing microscopy and electron microprobe techniques were used. The environmental risks were established by determining the pH and net neutralization potential added to leaching and mobility tests. The mineralogical study identified quartz, muscovite, microcline, albite, and kaolinite as the main phases, together with different sulfide oxidation products and precipitation/dissolution products in acid mine drainage: AFAs, jarosite, and native sulfur. The chemical-mineralogical analyses established that the main carriers of arsenic are Fe (oxyhydr)iron oxides, AFAs and jarosite. The environmental characterization determined that the waste has a typical pH of acid-generating materials. There is a risk of mobilization of arsenic (55.4 %) if environmental changes take place under reducing conditions. The mobilization of arsenic under leaching conditions in the medium/long term (10 years) occurs continuously (4.8 mg/kg). During this period the dissolution of jarosite and the neoformation of iron (oxyhydr) oxides take place.

**Keywords**—Leaching, Dump, Arsenic, (oxyhydr)oxides, AFAs.

## INTRODUCCIÓN

La explotación de yacimientos minerales genera grandes cantidades de residuos sólidos que son generalmente

acumulados en escombreras o en balsas y presas. En el caso de que los residuos contengan importantes cantidades de sulfuros metálicos, tales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotina ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arseno-

pirita (FeAsS), su exposición a la atmósfera puede entrañar graves problemas medioambientales. Bajo estas condiciones los sulfuros se oxidan, generando acidez y liberando sulfato y elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Pb, Cu, Zn, etc. (Johnson *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2000; Moncur *et al.*, 2004; F. Romero *et al.*, 2007; A. Romero y Flores, 2010) que, al ser transportados, pueden contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas e impactar en la biodiversidad de los ecosistemas cercanos (Bain *et al.*, 2000; Armienta *et al.*, 2001; Jung, 2001). Este proceso, conocido como drenaje ácido de minas (DAM), también se produce de forma natural, recibiendo el nombre de drenaje ácido de rocas, que tiene lugar en ambientes supergénicos cuando las rocas contienen sulfuros. Muchos yacimientos minerales metálicos se descubrieron en la antigüedad, probablemente, por la presencia de aguas ácidas rojizas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

La mina de Barruecopardo se localiza 2 km al sur del municipio del mismo nombre, al noroeste de la provincia de Salamanca, en la comarca de las Arribes, en donde la mena explotada era de wolframio presente principalmente como scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) (Fig. 1). La extracción de wolframio comenzó a principios de la década de 1930 y alcanzó su apogeo entre 1942 y 1945, aunque la mina siguió abierta hasta inicios de la década de los 80.

A comienzos de la década de los 80 la explotación cerró debido al descenso del precio de wolframio. Como consecuencia de esto quedaron infraestructuras e instalaciones abandonadas correspondientes a la planta de tratamiento, dos cortas de explotación de 800 m x 12 m x 20 m y de 500 m x 40 m x 90 m (esta última con aproximadamente un millón de metros cúbicos de agua ácida) y escombreras con más de 10 millones de toneladas de estériles finos y gruesos. Después de unos 10 años de estudios, trabajos de diseño, permisos y financiamiento, incluido un período de construcción de 15 meses, Saloro volvió a poner en funcionamiento la mina Barruecopardo a principios de 2019, con una planta e infraestructura renovadas. Las actividades mineras han sido diseñadas de forma que minimicen cualquier impacto medioambiental que puedan causar, a la vez que se asegura una alta recuperación.

### Contexto geológico

En la zona de estudio el material es metamórfico de edad precámbrica y paleozoica con presencia de rocas magmáticas más jóvenes. El yacimiento de Barruecopardo se encuentra en la zona apical del núcleo del granito y el depósito mineral está constituido por filones subverticales de cuarzo de dirección NNE-SSO y potencias entre 2 y 30 cm, dispuestos en bandas paralelas intragraníticas (Fig. 2). Muy relevante es el filón maestro, que tiene una potencia de 1 a 5 m y 1400 m de longitud. Los principales minerales presentes son scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) y wolframita ( $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$ ), que constituyen la mena, y en menor cantidad se encuentran la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) y otros sulfuros, junto con cuarzo, feldespato, mica y apatito.

### Toma de muestras

El muestreo se realizó en una antigua escombrera (Fig. 3A). Se tomaron muestras superficiales de gran fino (<10mm) en diferentes puntos de la escombrera, se mezclaron y se homogeneizaron para dar lugar a una única muestra (Fig. 3B) que fue sometida posteriormente al estudio químico-mineralógico y de caracterización ambiental.

### Caracterización química y mineralógica

Para llevar a cabo dicha caracterización se utilizaron diferentes técnicas como difracción de rayos X (método de polvo), microscopía óptica polarizante y microsonda electrónica.

### Difracción de rayos X (DRX)

El análisis por DRX tiene la finalidad de identificar las fases cristalinas presentes en la muestra. Para el presente análisis se aplicó el método de polvo y se empleó un difractómetro de rayos X D8 Advance Bruker del Servicio de Difracción de Rayos X de la Universidad de Salamanca (Fig. 4), con monocromador de grafito, goniómetro  $\theta/2\theta$  (500 mm de radio) y contador de centelleo. El voltaje y la intensidad del generador son de 40 kV y 30 mA, respectivamente. Se ha utilizado la radiación  $K\alpha$  del Cu ( $\lambda_{K\alpha} = 1.54 \text{ \AA}$ ) y las condiciones de barrido fueron: rango de  $2\theta$  de  $2^\circ$  a  $60^\circ$ , paso de barrido de  $0.04 [^\circ 2\theta]$  y tiempo de barrido por paso de 1 s.

Se obtuvieron dos difractogramas, uno a partir de la muestra tomada originalmente de la escombrera y otro de la muestra lixiviada, previamente molidas con un mortero de ágata hasta tamaño polvo ( $63\mu\text{m}$ ). La identificación de las fases cristalinas se realizó comparando los difractogramas de las muestras con los patrones experimentales almacenados en una base de datos de difracción de polvo ("Joint Committee on Powder Diffraction Standards-Powder Diffraction File", JCPDS-PDF).

### Microscopía óptica de luz polarizada

La caracterización de las fases presentes en las muestras objeto de estudio (original y lixiviada) se realizó mediante microscopía óptica de luz polarizada en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR), con un solo polarizador (LPP) y con dos polarizadores (LXP). El microscopio óptico de luz polarizada empleado es de la marca NIKON, con cámara digital acoplada, conectado a un monitor de TV (Fig. 5). Este equipo permite realizar observaciones tanto en luz transmitida como en luz reflejada.

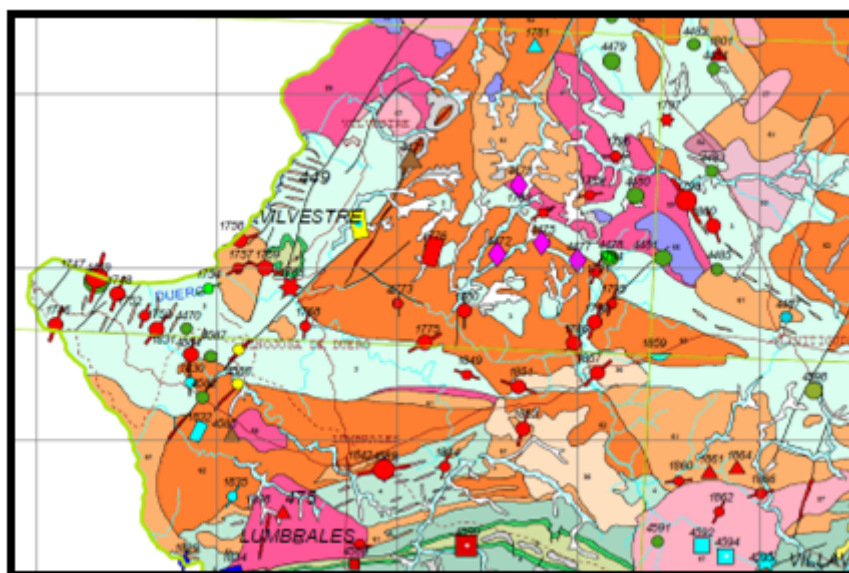
Se elaboraron 4 láminas delgadas pulidas en el Servicio de Preparación de Rocas de la Universidad de Salamanca. Para ello se embutieron las muestras original y lixiviada en resina y se obtuvieron dos láminas, una de la mitad superior y otra de la mitad inferior, de cada una de ellas.

### Microsonda electrónica

La microsonda electrónica ("Electron Probe Micro Analyzer", EPMA) utilizada es de la marca JEOL, modelo Superprobe JXA-8900, del Centro Nacional de Microscopía electrónica (CNME) de la Universidad Complutense de Madrid (Fig. 6).



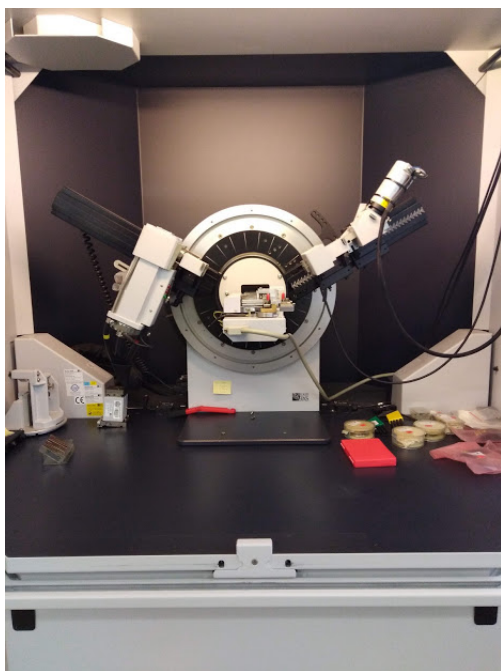
**Fig. 1:** Localización de la mina de Barruecopardo en la Península Ibérica (a), área minera de Barruecopardo (b), detalle de la escombrera objeto de estudio (c)



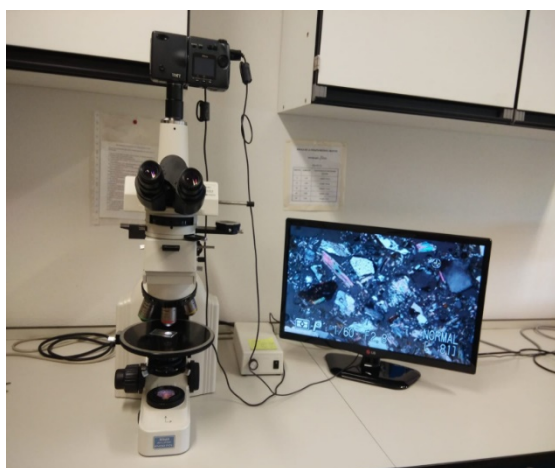
**Fig. 2:** Contexto geológico-minero de la mina de Barruecopardo (1776). 62: Granito de grano medio-grueso y dos micas. 3: Areniscas, pizarras y conglomerados cámbricos, en rojo: explotaciones e indicios de wolframio y estaño. Modificado del Mapa Geológico y Minero de Castilla y León (E. 1:400.000). (SIEMCALSA, 2009).



**Fig. 3:** (A) Escombrera antigua de la mina de Barruecopardo, (B) Detalle de la muestra homogeneizada



**Fig. 4:** Difractómetro de Rayos X



**Fig. 5:** Microscopio óptico polarizante



**Fig. 6:** Microsonda Electrónica JEOL

En la microsonda se llevaron a cabo los análisis químicos puntuales por espectroscopía de dispersión de longitud de onda (“Wavelength dispersive spectroscopy”, WDS) sobre las láminas delgadas pulidas. Estas láminas se recubrieron con carbono en un metalizador. Las condiciones de análisis han

sido: voltaje 15 kV, corriente del haz 20 nA, diámetros de haz entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  y tiempo de conteo 10 s en la posición del pico y 5 s en la de cada “background”.

Los elementos analizados y los patrones correspondientes utilizados (entre paréntesis) han sido: Al y Si (sillimanita), Fe (almandino), P (fluorapatito), As (arseniuro de galio), S (galena), K (feldespato potásico), Na (albita), Mn (pirolusita), Ca (kaersutita), Ti (ilmenita), F y Cl (fluorapatito).

### **Caracterización ambiental**

La caracterización ambiental de la muestra de los residuos mineros tomados de la escombrera incluyó la determinación de los siguientes parámetros:

- Potencial de hidrógeno (pH)
- Potencial de neutralización Neto (PNN)
- Contenido total de As, Fe y S
- Contenido lixiviable de As, Fe y S
- Movilidad de As, Fe y S en condiciones ambientales cambiantes y bajo condiciones de lixiviación a corto y medio/largo plazo.

### **Potencial de hidrógeno**

Para la medida del pH se aplicó el método de la pasta saturada. Para ello la muestra molida (tamaño de partícula < 0.250 mm) se saturó con  $\text{H}_2\text{O}$  y tras un periodo de equilibración de 30 min se introdujo un electrodo de pH (pH-metro) para medir su alcalinidad o acidez.

### **Potencial de neutralización neto**

El PNN se determinó por cálculo estableciendo la diferencia entre el potencial de neutralización (PN) y el potencial ácido (PA) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$  Cálculo del potencial de neutralización neto

### **Potencial de neutralización**

El PN se determinó mediante el método de Sobek et al. (1978). De acuerdo con este método, la muestra molida (tamaño de partícula < 0.250 mm) se sometió en un matraz Erlenmeyer a un proceso de calentamiento con  $\text{HCl}$  0.1 M a una temperatura de 90 °C hasta que la reacción de neutralización se completó. Posteriormente, el exceso de ácido se valoró con  $\text{NaOH}$  0.1 M para determinar la cantidad de ácido consumido por la muestra. El PN se expresa como la cantidad equivalente de carbonato cálcico disponible en la muestra para neutralizar la acidez producida por 1 t de material ( $\text{kg CaCO}_3/\text{t}$ ).

### **Potencial ácido**

El PA se calculó directamente a partir del contenido total de S en la muestra, estableciendo de este modo la cantidad máxima de ácido sulfúrico que podría ser generada a partir de ella. El PA se expresa como la cantidad de carbonato cálcico requerida para neutralizar la acidez producida por 1 t de material ( $\text{kg CaCO}_3/\text{t}$ ), realizándose su cálculo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{kg CaCO}_3}{\text{t}} = 31,25 * \text{S}(\%) \quad (1)$$

Una vez obtenidos el PN y el PA, se aplica la Ecuación 1 y el valor del PNN resultante se categoriza de acuerdo con los siguientes criterios (Tabla 1):

**Tabla 1:** Criterios para categorización de PNN

| VALOR          | CRITERIO               |
|----------------|------------------------|
| PNN < -20      | Generador de acidez    |
| -20 < PNN < 20 | Zona de incertidumbre  |
| PNN > 20       | No Generador de acidez |

### Contenidos totales

Se midieron los contenidos totales de As, Fe y S presentes en la muestra. Para ello la muestra finamente molida (tamaño de partícula < 0.1 mm) fue sometida a un proceso de digestión con agua regia (HNO<sub>3</sub> y HCl en proporción 1:3) utilizando una relación sólida/extractante de 0.5/10 g/mL. El proceso de digestión se llevó a cabo por medio de un horno microondas Milestone Ethos Plus a una temperatura de 190 °C durante 15 m. El extracto obtenido fue transferido a un matraz aforado de 25 mL, siendo posteriormente enrasado con agua ultrapura. El análisis de As, Fe y S en el extracto se realizó por espectrometría de emisión óptica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) en el Servicio de Análisis e Instrumentación del IRNASA, utilizando un espectrómetro Varian 720-ES.

### Contenidos lixiviables

Se midieron los contenidos lixiviables de As, Fe y S presentes en la muestra siguiendo el test estándar de lixiviación europeo EN-12457-4 (2002). De acuerdo con dicho test, la muestra (tamaño de partícula 10 mm) se sometió a un periodo de agitación de 24 horas con agua ultrapura utilizando una relación sólida/extractante de 10/1 mL/g. Para realizar el periodo de agitación se empleó un agitador de volteo trabajando a 10 revoluciones por minuto (rpm). Transcurrido el periodo de agitación, la suspensión se dejó sedimentar y el sobrenadante se filtró a través de filtros de membrana de 0.45 µm. El análisis de As, Fe y S en el extracto se realizó por ICP-OES.

### Estudios de movilidad

#### Movilidad de As, Fe y S en condiciones ambientales cambiantes

La movilidad del As, Fe y S en condiciones ambientales cambiantes se determinó usando el protocolo BCR ("Bureau Communautaire de Référence") modificado tal y como establecieron Rauret *et al.* (1999) Dicho protocolo consta de tres etapas en las que se extraen de forma sucesiva los elementos movilizables en condiciones ácidas, en condiciones reductoras y en condiciones oxidantes. Estas tres etapas se completan con una cuarta en la que se determinan los elementos presentes en la fracción residual.

##### a) Primera Etapa-Fracción soluble en ácido

La muestra fue extraída con ácido acético 0.11 M empleando una relación sólida/extractante 1/40 (g/mL) y un periodo de agitación de 16 horas (realizado por medio de un agitador de volteo). Para la obtención del extracto la suspensión fue separada por centrifugación.

##### b) Segunda Etapa-Fracción reducible

El residuo obtenido de la primera etapa fue extraído con cloruro de hidroxilamina 0.5 M. empleando una relación sólido/extractante 1/40 (g/mL) y un periodo de agitación de 16 horas (realizado por medio de un agitador de volteo). Para la obtención del extracto la suspensión fue separada por centrifugación.

El residuo obtenido de la segunda etapa se sometió en primer lugar a un proceso de digestión con peróxido de hidrógeno 8.8 M empleando una relación sólido/líquido 1/10 (g/mL) durante 2 horas (la primera a temperatura ambiente y la segunda a 85 °C), posteriormente se realizó un segundo proceso de digestión con peróxido de hidrógeno 8.8 M empleando una relación sólido/líquido 1/10 (g/mL) durante 1 hora a 85 °C, y finalmente se realizó una extracción con acetato de amonio 1 M empleando una relación sólido/extractante 1/50 (g/mL) y un periodo de agitación de 16 horas (realizado por medio de un agitador de volteo). Para la obtención del extracto la suspensión fue separada por centrifugación.

##### d) Cuarta Etapa-Fracción residual

El residuo de la etapa anterior se sometió a un proceso de digestión con agua regia utilizando las mismas condiciones empleadas en la determinación de los contenidos totales.

Los extractos obtenidos de las diferentes etapas fueron analizados para la determinación de As, Fe y S por ICP-OES.

#### Movilidad de As, Fe y S bajo condiciones de lixiviación a corto y medio/largo plazo

La movilidad de As, Fe y S bajo condiciones de lixiviación a corto (1 año) y medio/largo (10 años) plazo se evaluó realizando estudios de lixiviación en columna. Para ello columnas de vidrio de 2.95 cm de diámetro x 15 cm de altura rellenas con 100 g de muestra fueron percoladas con agua ultrapura en régimen saturado a una velocidad de flujo de 60 mL/h por medio de una bomba peristáltica de doble vía. El volumen de agua percolado en los estudios de lixiviación a corto plazo fue de 600 mL (equivalente a la precipitación anual en Barreco, que es aproximadamente de 900 mm) y de 6L en los estudios de lixiviación a medio/largo plazo. El agua percolada se recogió en fracciones sucesivas de 25 mL en el caso de los estudios de lixiviación a corto plazo y de 150 mL en el caso de los estudios de lixiviación a medio/largo plazo, utilizando un colector de fracciones. Todos los lixiviados fueron analizados por ICP-OES para la determinación de la concentración de As, Fe y S.

Los residuos sometidos a lixiviación a medio/largo plazo fue caracterizados mineralógicamente siguiendo las mismas técnicas y procedimientos descritos anteriormente.

## RESULTADOS

### Caracterización mineralógica y química de la muestra tomada de la escombrera

#### Difracción de rayos X

Los minerales identificados mediante difracción de rayos X (Fig. 7) son:

- Cuarzo: SiO<sub>2</sub>
- Moscovita: KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub>

**Tabla 2:** Análisis químicos puntuales de cuarzo expresados en % en peso de óxidos

| Óxidos                         | Análisis     |              |              |            |              | Media | Rango        |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|-------|--------------|
|                                | 1            | 2            | 3            | 4          | 5            |       |              |
| SiO <sub>2</sub>               | 99.21        | 97.73        | 97.87        | 100.00     | 97.25        | 98.41 | 97.25 - 100  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <l.d.*       | 0.05         | 0.02         | <l.d.      | 0.04         | 0.04  | <l.d. - 0.05 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01         | 0.23         | 0.02         | 0.52       | 0.01         | 0.05  | 0.01 - 0.52  |
| MnO                            | 0.01         | 0.01         | <l.d.        | 0.01       | <l.d.        | 0.01  | <l.d. - 0.01 |
| MgO                            | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.      | <l.d.        | <l.d. | <l.d.        |
| CaO                            | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | 0.01       | 0.01         | 0.01  | <l.d. - 0.01 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.04         | <l.d.        | 0.04         | <l.d.      | <l.d.        | 0.04  | <l.d. - 0.04 |
| K <sub>2</sub> O               | <l.d.        | <l.d.        | 0.01         | <l.d.      | <l.d.        | 0.01  | <l.d. - 0.01 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02         | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.      | <l.d.        | 0.02  | <l.d. - 0.02 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | <l.d.        | <l.d.        | 0.01         | <l.d.      | 0.01         | 0.01  | <l.d. - 0.01 |
| SO <sub>3</sub>                | <l.d.        | 0.02         | 0.01         | <l.d.      | <l.d.        | 0.02  | <l.d. - 0.02 |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.      | <l.d.        | <l.d. | <l.d.        |
| F                              | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.      | <l.d.        | <l.d. | <l.d.        |
| Cl                             | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.      | <l.d.        | <l.d. | <l.d.        |
| <b>Total</b>                   | <b>99.29</b> | <b>98.03</b> | <b>97.98</b> | <b>100</b> | <b>97.33</b> |       |              |

- Microclina: KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>
- Albita: NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>
- Caolinita: Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>

### Microscopia óptica de luz polarizada

Las observaciones realizadas al microscopio óptico de luz polarizada en luz transmitida han permitido identificar las siguientes fases:

- Cuarzo: aparece en fragmentos mono y policristalinos generalmente fracturados y con extinción ondulante (Fig. 8 B, C, D, y Fig. 9 E, F).
- Feldespatos: se observan principalmente microclina (feldespato potásico) (Fig. 8A, C, y Fig. 8F) y albita (plagioclase sódica) con las típicas maclas tipo “tartán” y polisintética, respectivamente (Fig. 8B).
- Micas: destaca la abundancia de moscovita que en algunos casos se encuentra deflecada (Fig. 8 A, B), con oxihidróxidos de hierro en los planos de exfoliación y también recubriéndola (Fig. 8B). La biotita es muy escasa y a veces está alterada a moscovita y clorita.
- oxihidróxidos de hierro: se presentan principalmente solos y ligados a micas (Fig. 9B, C y Fig. 9F) y, en menor proporción, alrededor de cuarzo (Fig. 8D) y feldespatos (Fig. 9F).
- Arseniatos férricos hidratados amorfos (AFAs): se reconocen por su tonalidad marrón, naranja o marrón rojiza, por su aspecto craquelado y por ser (Murciego *et al.*, 2011). Aparecen como fragmentos de forma aislada (Fig. 8A) y como fase cementante, empastando fragmentos de cuarzo y de mica (Fig. 8D). Al tratarse de fases amorfas no han sido detectadas en difracción de rayos X.
- Jarosita: se presenta como agregados de partículas esféricas de tonalidades marrones de tamaño muy pequeño

(algunas micras), finamente distribuidos (Fig. 9E). Se ha comprobado que este mineral en esta escombrera es producto de alteración de pirita y marcasita (Aldana *et al.*, 2014).

- Azufre: presenta una tonalidad gris amarillenta y se encuentra en los bordes de fragmentos de cuarzo y feldespatos (Fig. 9F). Está presente por ser un producto común de la biolixiviación de sulfuros alterados distintos de la pirita (Rodríguez y Menor-Salván, 2012).

### Microsonda electrónica

Se han realizado análisis químicos puntuales sobre diferentes minerales y sobre otras fases presentes en la muestra tomada de la escombrera:

Sobre el cuarzo se han realizado 5 análisis químicos puntuales (Tabla 2). Su contenido en SiO<sub>2</sub> varía entre 97.25 y 100 %, con una media del 98.41 %. El contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encuentra dentro del rango 0.01 – 0.52 %. El resto de elementos analizados presentan concentraciones entre el límite de detección y 0.01 (MnO, CaO, K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 0.02 (TiO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>) y 0.04 (Na<sub>2</sub>O) e inferiores al límite de detección (MgO y As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

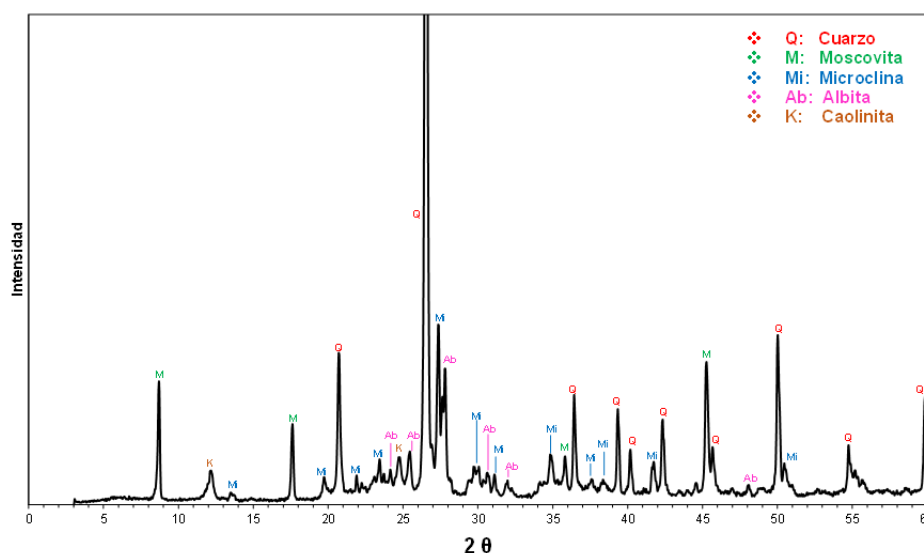
Sobre los feldespatos se realizaron 6 análisis (Tabla 3), cinco de ellos sobre feldespatos potásicos (microclina) y uno sobre plagioclase sódica (albita). En la microclina las concentraciones de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O oscilan entre 63.17 y 65.21 %, 18.35 y 19.48 % y entre 14.54 y 16.09 %, respectivamente, valores próximos a la fórmula ideal (webmineral.com: 64.76, 18.32 y 16.92 % respectivamente). Los contenidos de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> son inferiores a 0.01 % y los de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SO<sub>3</sub>, inferiores a 0.02 %. En la albita los contenidos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O y CaO son: 68.12, 20.03, 10.82 y 0.12 %, respectivamente, próximos a la fórmula ideal (webmineral.com: 67.39, 20.35, 11.19 y 1.07 %, respectivamente) salvo el contenido de CaO, ligeramente inferior. El contenido de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> es inferior al límite de detección, y los de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SO<sub>3</sub>, inferiores al 0.01 %.

Se realizaron 9 análisis sobre moscovita (Tabla 4). En ellos los contenidos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O oscilan entre 43.75 y 46.05 %, entre 33.56 y 36.64 % y entre el 6.49 y 9.78 %, entre

**Tabla 3:** Análisis químicos puntuales de feldespatos (microclina: 1-5, albita: 6) expresados en % en peso de óxidos

| Óxidos                         | Análisis     |              |              |              |               |              | Media | Rango         |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-------|---------------|
|                                | 1            | 2            | 3            | 4            | 5             | 6            |       |               |
| SiO <sub>2</sub>               | 65.21        | 63.26        | 63.76        | 63.17        | 64.76         | 68.12        | 64.69 | 63.17 - 68.12 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.92        | 18.79        | 19.09        | 18.35        | 19.48         | 20.03        | 19.10 | 18.35 - 20.03 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <l.d.*       | 0.02         | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.         | 0.01         | 0.01  | <l.d. - 0.02  |
| MnO                            | <l.d.        | <l.d.        | 0.01         | <l.d.        | <l. d.        | 0.01         | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| MgO                            | <l.d.        | 0.01         | 0.01         | <l. d.       | <l. d.        | <l. d.       | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| CaO                            | <l.d.        | 0.03         | 0.02         | <l. d.       | 0.01          | 0.12         | 0.03  | <l.d. - 0.12  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.20         | 0.88         | 1.05         | 0.38         | 0.08          | 10.82        | 0.62  | 0.38 - 10.82  |
| K <sub>2</sub> O               | 14.54        | 15.69        | 14.96        | 15.86        | 16.09         | 0.03         | 5.53  | 0.03 - 16.09  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02         | 0.30         | 0.07         | <l. d.       | <l. d.        | <l. d.       | 0.08  | <l.d. - 0.30  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | <l.d.        | 0.56         | 0.16         | 0.10         | 0.17          | 0.06         | 0.16  | <l.d. - 0.56  |
| SO <sub>3</sub>                | 0.02         | 0.02         | 0.02         | 0.01         | 0.01          | 0.01         | 0.01  | 0.01 - 0.02   |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0.01         | 0.00         | 0.01         | <l. d.       | <l. d.        | <l. d.       | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| F                              | 0.02         | 0.02         | <l. d.       | <l.d.        | <l. d.        | <l.d.        | 0.02  | <l.d. - 0.02  |
| Cl                             | <l.d.        | 0.01         | <l. d.       | <l.d.        | <l. d.        | <l.d.        | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| <b>Total</b>                   | <b>98.92</b> | <b>99.59</b> | <b>99.15</b> | <b>97.87</b> | <b>100.60</b> | <b>99.21</b> |       |               |

\* <l.d.: Inferior al límite de detección



**Fig. 7:** Difractograma de la muestra tomada de la escombrera

respectivamente, valores que difieren de la composición de referencia (webmineral: 45.21, 38.36 y 11.81 %, respectivamente). Los contenidos en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y TiO<sub>2</sub>, que oscilan entre 1.24 y 3.83 y entre 0.24 y 0.89 %, respectivamente, justificarían las diferencias observadas. Las concentraciones de SO<sub>3</sub> varían entre <l.d. y 0.02 % y las de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre <l.d. y 0.06 %.

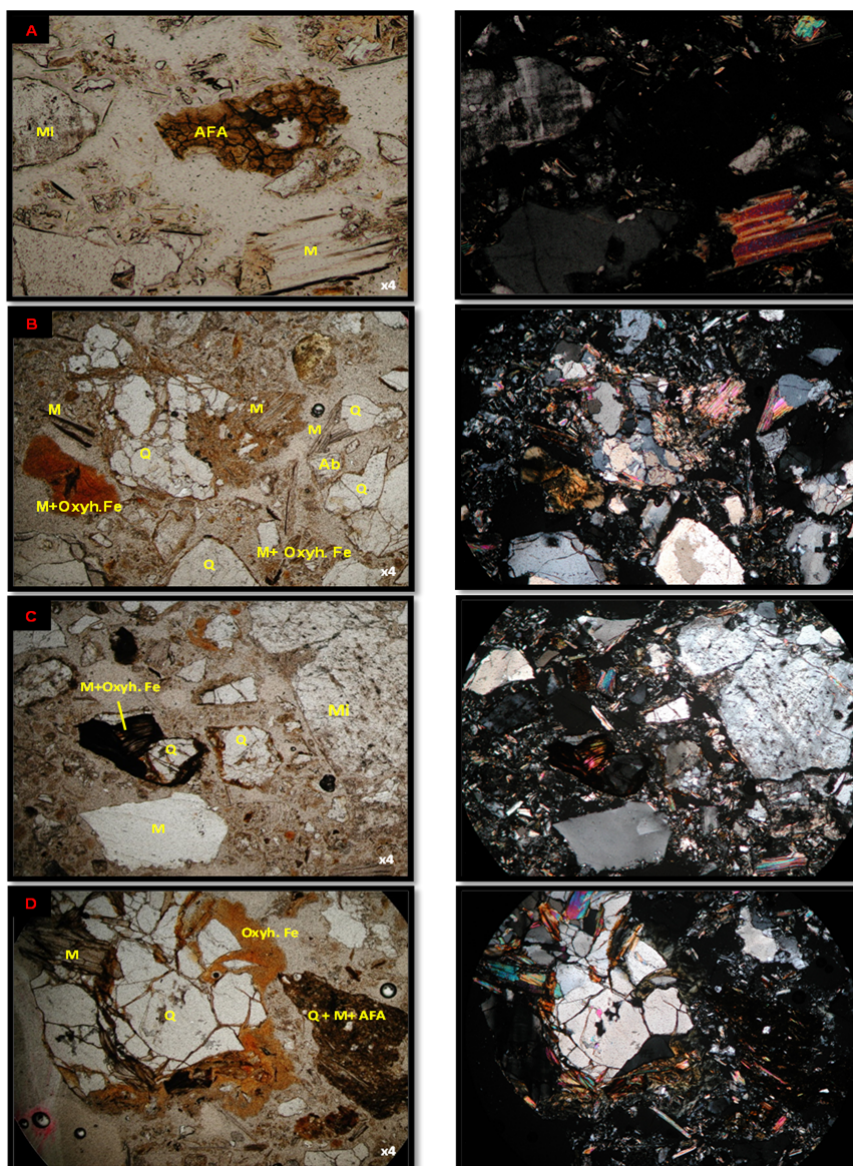
Sobre los oxihidróxidos de Fe se realizaron 4 análisis (Tabla 5 y Fig. 9A), en los que los contenidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varían entre 79.21 y 81.90 %, los de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, entre 3.01 y 4.46 %; y los de SO<sub>3</sub>, entre 0.12 y 0.24 %. Asimismo, se observan contenidos menores o traza de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.26 - 1.54 %), SiO<sub>2</sub> (0.52 - 1.27 %), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.55 - 0.57 %), CaO (0.17 - 0.18 %), K<sub>2</sub>O (0.05 - 0.21 %), TiO<sub>2</sub> (0.03 - 0.14 %), MgO (<l.d. - 0.8) y MnO (<l.d. - 0.01). Esta composición química, combinada con las observaciones al microscopio, sugieren que estas fases pueden corresponder a goethita, que aparece como producto de alteración de pirita/marcasita de la misma escombrera (Murciego *et al.*, 2011; Aldana *et al.*, 2014).

Sobre los filosilicatos impregnados de oxihidróxidos de Fe (Fig. 9B) se realizaron 11 análisis (Tabla 6), obteniéndose los siguientes rangos de concentración para cada óxido:

SiO<sub>2</sub> 26.85 % - 42.82 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12.31 - 30.02 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5.73 - 37.25 %, As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 0.60 - 2.35 %, SO<sub>3</sub> 0.08 - 0.25 %, K<sub>2</sub>O 0.20 - 2.57 %, Na<sub>2</sub>O 0.03 - 0.93 %, MgO 0.24 - 0.73 %, CaO 0.04 - 0.53 %, TiO<sub>2</sub> 0.10 - 0.44 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.03 - 0.39 %, y Cl 0.01 - 0.10 %. Los porcentajes en peso para el magnesio y el flúor son bajos y próximos a los límites de detección.

Sobre los arseniatos férricos amorfos (AFAs) se realizaron 11 análisis (Tabla 7). Las concentraciones de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varían entre 32.95 y 42.61, 35.62 y 48.71 %, 1.74 y 18.43 %, y 0.06 y 0.53 %, respectivamente.

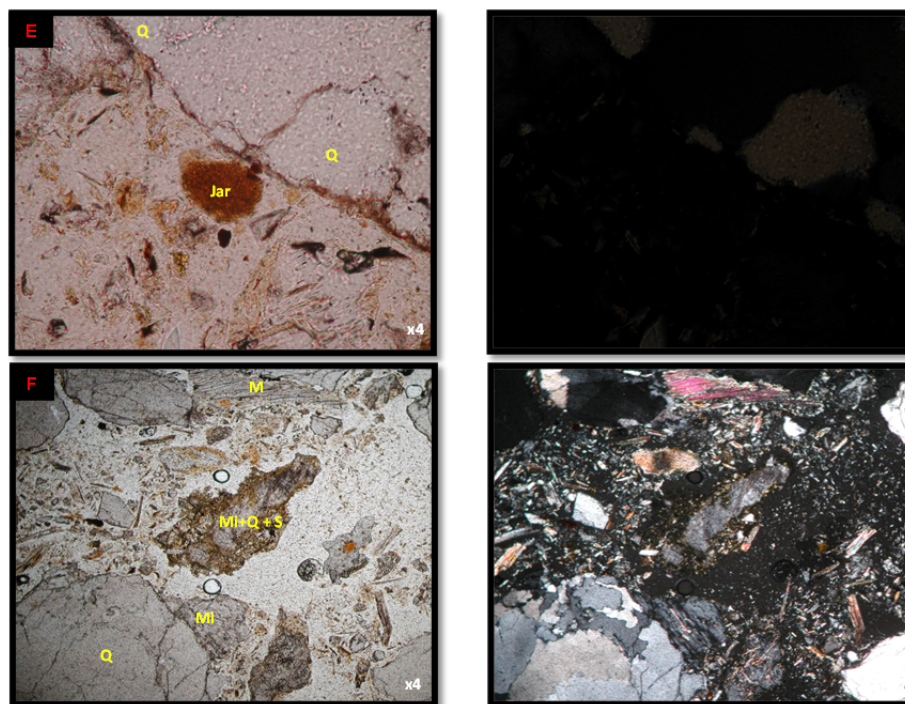
Sobre la jarosita se llevaron a cabo 8 análisis (Tabla 8) en los que los contenidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SO<sub>3</sub> varían entre 41.20 y 45.45 % y entre 29.83 y 35.24 %, respectivamente. Sus contenidos de K<sub>2</sub>O (entre 0.27 y 0.96 %), Na<sub>2</sub>O (entre 0.71 y 1.12 %) y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (entre 0.08 y 1.02 %) son, por lo general, inferiores al 1 %.



**Fig. 8:** Fotografías obtenidas de la muestra tomada de la escombrera con el microscopio óptico de luz polarizada. En la columna izquierda se presentan las fotografías obtenidas con un polarizador y en la derecha, con dos polarizadores. Q (cuarzo), M (micas), Mi (microclina), Ab (Albita), Oxyh.Fe (oxihidróxidos de Fe), AFA (arseniatos férricos hidratados amorfos).

**Tabla 4:** Análisis químicos puntuales de moscovita expresados en % en peso de óxidos

| Óxidos                         | Análisis |       |       |       |       |       |       |       |       | Media | Rango         |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|                                | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |       |               |
| SiO <sub>2</sub>               | 44.73    | 45.51 | 46.05 | 45.83 | 46.05 | 45.92 | 45.63 | 43.75 | 44.38 | 45.31 | 43.75 - 46.05 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 35.73    | 35.68 | 35.16 | 35.85 | 35.57 | 36.00 | 36.64 | 33.56 | 34.22 | 35.37 | 33.56 - 36.00 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.39     | 1.24  | 1.53  | 3.83  | 2.48  | 1.97  | 1.94  | 1.76  | 1.28  | 1.82  | 1.24 - 3.83   |
| MnO                            | 0.01     | 0.02  | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | 0.02  | <l.d. | <l.d. | 0.01  | <l.d. - 0.02  |
| MgO                            | 0.61     | 0.60  | 0.64  | 0.70  | 0.72  | 0.54  | 0.49  | 0.64  | 0.60  | 0.61  | 0.49 - 0.72   |
| CaO                            | 0.01     | 0.02  | <l.d. | 0.02  | <l.d. | 0.01  | 0.01  | 0.02  | 0.03  | 0.01  | <l.d. - 0.03  |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.71     | 0.40  | 0.48  | 0.35  | 0.27  | 0.46  | 0.57  | 0.66  | 0.10  | 0.43  | 0.10 - 1.71   |
| K <sub>2</sub> O               | 9.09     | 9.78  | 9.55  | 7.16  | 6.49  | 9.56  | 8.96  | 9.78  | 8.56  | 8.69  | 6.49 - 9.78   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.89     | 0.24  | 0.62  | 0.44  | 0.28  | 0.38  | 0.55  | 0.83  | 0.84  | 0.51  | 0.24 - 0.89   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.03     | <l.d. | <l.d. | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | <l.d. | 0.02  | 0.02  | <l.d. - 0.03  |
| SO <sub>3</sub>                | <l.d.    | 0.02  | <l.d. | 0.02  | 0.00  | <l.d. | <l.d. | 0.02  | 0.00  | 0.01  | <l.d. - 0.02  |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0.02     | <l.d. | 0.01  | 0.06  | 0.06  | 0.02  | 0.03  | 0.02  | 0.03  | 0.02  | <l.d. - 0.06  |
| F                              | 0.15     | 0.13  | 0.19  | 0.10  | 0.19  | 0.24  | 0.22  | 0.20  | 0.15  | 0.17  | <l.d. - 0.24  |
| Cl                             | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | 0.01  | <l.d. | <l.d. | <l.d. | 0.01  | 0.01  | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| Total                          | 94.28    | 93.56 | 94.14 | 94.35 | 92.03 | 95.00 | 94.97 | 91.14 | 90.15 |       |               |



**Fig. 9:** Fotografías obtenidas de la muestra tomada de la escombrera con el microscopio óptico de luz polarizada. En la columna izquierda se presentan las fotografías obtenidas con un polarizador y en la derecha, con dos polarizadores. Q (cuarzo), M (micas), Mi (microclina), Ab (Albita), Oxyh.Fe (oxihidróxidos de Fe), AFA (arseniatos férricos hidratados amorfos), Jar (jarosita), S (azufre).

**Tabla 5:** Análisis químicos puntuales de oxihidróxidos de Fe expresados en % en peso de los óxidos

| Óxidos                         | Análisis     |              |              |              | Media | Rango         |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------|
|                                | 1            | 2            | 3            | 4            |       |               |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.92         | 0.67         | 1.27         | 0.52         | 0.80  | 0.52 - 1.27   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.54         | 1.33         | 1.26         | 1.26         | 1.34  | 1.26 - 1.54   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 81.62        | 79.21        | 80.20        | 81.90        | 80.73 | 79.21 - 81.90 |
| MnO                            | 0.01         | <l.d.*       | <l.d.        | <l.d.        | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| MgO                            | 0.08         | 0.04         | <l.d.        | <l.d.        | 0.06  | <l.d. - 0.08  |
| CaO                            | 0.17         | 0.18         | 0.17         | 0.18         | 0.17  | 0.17 - 0.18   |
| Na <sub>2</sub> O              | <l.d.        | 0.08         | 0.13         | 0.15         | 0.12  | <l.d. - 0.15  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.21         | 0.15         | 0.14         | 0.05         | 0.12  | 0.05 - 0.21   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.03         | 0.14         | 0.12         | 0.03         | 0.06  | 0.03 - 0.14   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.55         | 0.57         | 0.54         | 0.55         | 0.55  | 0.55 - 0.57   |
| SO <sub>3</sub>                | 0.14         | 0.24         | 0.12         | 0.14         | 0.15  | 0.12 - 0.24   |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 3.08         | 4.46         | 3.01         | 3.23         | 3.40  | 3.01 - 4.46   |
| F                              | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d.        | <l.d. | <l.d.         |
| Cl                             | 0.01         | 0.01         | <l.d.        | 0.01         | 0.01  | <l.d. - 0.01  |
| <b>Total</b>                   | <b>88.35</b> | <b>87.07</b> | <b>86.97</b> | <b>88.02</b> |       |               |

## Caracterización Ambiental

### Potencial de Hidrógeno

El pH de la muestra es de 3.7. Este valor indica que los residuos minerales estudiados podrían ser generadores de acidez ya que normalmente valores de pH inferiores a 4 son indicativos de esta característica.

### Potencial de neutralización neto

El PN presenta un valor de 0 kg CaCO<sub>3</sub>/t, indicando que la muestra no posee capacidad para neutralizar la acidez que ésta pueda generar, ni siquiera parcialmente (Tabla 9). El PA obtenido exhibe un valor relativamente bajo (1.73 kg

CaCO<sub>3</sub>/t). Este valor es consistente con el escaso contenido de sulfuros detectado en la muestra por difracción de rayos X y microscopía óptica. El PA solo hace referencia a la acidez generada a partir de la oxidación de los sulfuros. No obstante, existen otras reacciones capaces de generar acidez como son la disolución de sales solubles de sulfato de hierro (III) y la precipitación de hidróxidos de hierro. El PNN presenta un valor negativo, con lo que teóricamente los residuos estudiados serían potenciales generadores de acidez. Sin embargo, su valor es relativamente pequeño (-1.73 kg CaCO<sub>3</sub>/t), estando comprendido dentro de la zona de incertidumbre (de -20 a 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t). Por lo tanto, no se puede asegurar con total seguridad si en la práctica estos residuos generarían acidez

**Tabla 6:** Análisis químicos puntuales de filosilicatos + oxihidróxidos de Fe expresados en % en peso de los óxidos

| Óxidos                         | Análisis |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Media | Rango         |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|                                | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |       |               |
| SiO <sub>2</sub>               | 39.93    | 38.67 | 42.82 | 39.87 | 38.97 | 34.15 | 35.49 | 26.85 | 39.80 | 39.26 | 41.94 | 37.71 | 26.85 - 41.94 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.31    | 28.12 | 29.54 | 26.91 | 29.43 | 23.92 | 24.75 | 22.06 | 12.34 | 30.02 | 28.26 | 23.31 | 12.31 - 30.02 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 32.16    | 6.34  | 6.50  | 9.14  | 7.37  | 5.73  | 6.64  | 37.25 | 32.74 | 7.91  | 6.85  | 10.76 | 5.73 - 37.25  |
| MnO                            | <l.d.*   | <l.d. | 0.01  | 0.01  | <l.d. | 0.00  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | <l.d. | 0.01  | <l.d. - 0.02  |
| MgO                            | 0.36     | 0.51  | 0.69  | 0.73  | 0.32  | 0.39  | 0.38  | 0.24  | 0.36  | 0.41  | 0.60  | 0.43  | 0.24 - 0.73   |
| CaO                            | 0.35     | 0.19  | 0.16  | 0.14  | 0.04  | 0.04  | 0.05  | 0.53  | 0.35  | 0.30  | 0.29  | 0.16  | 0.04 - 0.53   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.93     | 0.40  | 0.39  | 0.18  | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.26  | 0.06  | 0.03  | 0.04  | 0.12  | 0.03 - 0.93   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.20     | 1.71  | 1.92  | 1.86  | 1.68  | 1.48  | 1.47  | 2.57  | 0.38  | 1.61  | 1.68  | 1.25  | 0.20 - 2.57   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.10     | 0.40  | 0.44  | 0.40  | 0.30  | 0.33  | 0.16  | 0.10  | 0.28  | 0.24  | 0.10  | 0.22  | 0.10 - 0.44   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.18     | 0.14  | 0.15  | 0.09  | 0.06  | 0.03  | 0.03  | 0.39  | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.07  | 0.03 - 0.39   |
| SO <sub>3</sub>                | 0.08     | 0.11  | 0.10  | 0.25  | 0.16  | 0.21  | 0.24  | 0.13  | 0.09  | 0.15  | 0.09  | 0.13  | 0.08 - 0.25   |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 1.90     | 0.97  | 1.00  | 1.62  | 1.07  | 0.60  | 0.65  | 2.35  | 1.43  | 0.89  | 0.93  | 1.12  | 0.60 - 2.35   |
| F                              | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d.         |
| Cl                             | 0.01     | 0.09  | 0.02  | 0.10  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | <l.d. | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.01 - 0.10   |
| Total                          | 88.50    | 77.64 | 83.73 | 81.29 | 79.48 | 66.96 | 69.93 | 92.73 | 87.85 | 80.89 | 80.83 |       |               |

**Tabla 7:** Análisis químicos puntuales de AFAs expresados en % en peso de los óxidos

| Óxidos                         | Análisis |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Media | Rango         |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|                                | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |       |               |
| SiO <sub>2</sub>               | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | 0.07  | 0.07  | 0.09  | 0.03  | 0.02  | 0.04  | 0.22  | <l.d. | 0.06  | <l.d. - 0.22  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | 0.04  | <l.d. | 0.12  | <l.d. | <l.d. | 0.07  | <l.d. - 0.12  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 37.65    | 38.69 | 40.17 | 35.62 | 38.91 | 41.81 | 45.11 | 37.43 | 42.5  | 48.71 | 37.93 | 40.25 | 35.62 - 48.71 |
| MnO                            | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | 0.03  | 0.01  | <l.d. | <l.d. | <l.d. | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | <l.d. - 0.03  |
| Na <sub>2</sub> O              | <l.d.    | <l.d. | <l.d. | 0.02  | 0.03  | <l.d. | <l.d. | 0.05  | 0.04  | <l.d. | 0.02  | 0.03  | <l.d. - 0.05  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01     | <l.d. | 0.01  | 0.01  | 0.02  | <l.d. | <l.d. | 0.04  | <l.d. | <l.d. | 0.03  | 0.02  | <l.d. - 0.04  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.3      | 0.36  | 0.52  | 0.06  | 0.21  | 0.29  | 0.38  | 0.02  | 0.53  | 0.34  | 0.14  | 0.21  | 0.06 - 0.53   |
| SO <sub>3</sub>                | 1.74     | 9.39  | 10.01 | 18.43 | 3.71  | 6.27  | 5.18  | 11.57 | 6.6   | 3.17  | 8.13  | 6.38  | 1.74 - 18.43  |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 32.95    | 42.42 | 35.58 | 40.9  | 42.41 | 41.1  | 38.63 | 36.78 | 33.04 | 41.08 | 42.61 | 38.70 | 32.95 - 42.61 |
| TOTAL                          | 72.65    | 90.86 | 86.29 | 95.14 | 85.37 | 89.56 | 89.37 | 85.91 | 82.89 | 93.55 | 88.89 |       |               |

**Tabla 8:** Análisis químicos puntuales de jarosita expresados en % en peso de los óxidos

| Óxidos                         | Análisis |       |       |       |       |       |       |       | Media | Rango         |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|                                | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |       |               |
| SO <sub>3</sub>                | 33.69    | 34.32 | 29.83 | 33.87 | 35.24 | 32.05 | 33    | 33.74 | 33.24 | 29.83 - 35.24 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 45.45    | 42.49 | 41.2  | 44.8  | 45.02 | 44.45 | 44.15 | 45.05 | 44.05 | 41.20 - 45.45 |
| K <sub>2</sub> O               | 0.27     | 0.75  | 0.82  | 0.65  | 0.49  | 0.91  | 0.62  | 0.96  | 0.64  | 0.27 - 0.96   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.81     | 0.85  | 0.61  | 1.04  | 1.12  | 0.71  | 1.06  | 1.03  | 0.89  | 0.71 - 1.12   |
| As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0.25     | 0.41  | 3.98  | 0.32  | 0.19  | 2.29  | 0.36  | 0.41  | 0.55  | 0.19 - 3.98   |
| MnO                            | <l.d.*   | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d. | <l.d.         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | <l.d.    | <l.d. | 0.03  | 0.01  | 0.03  | 0.08  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | <l.d. - 0.08  |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.59     | 1.6   | 4.75  | 0.8   | 0.43  | 2.08  | 1.47  | 1.22  | 1.41  | 0.43 - 4.75   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.08     | 0.15  | 1.02  | 0.17  | 0.14  | 0.54  | 0.13  | 0.2   | 0.21  | 0.08 - 1.02   |
| TOTAL                          | 82.14    | 80.57 | 82.24 | 81.66 | 82.66 | 83.11 | 81.24 | 82.63 |       |               |

**Tabla 10:** Contenidos totales (Digestión en agua regia)

| Elemento | Contenido total (mg/kg) |
|----------|-------------------------|
| As       | 4005                    |
| Fe       | 13602                   |
| S        | 555                     |

derivada de la oxidación de sulfuros.

**Tabla 9:** Potencial de neutralización neto (PNN)

| PN                        | PA                        | PNN                       |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| (kg CaCO <sub>3</sub> /t) | (kg CaCO <sub>3</sub> /t) | (kg CaCO <sub>3</sub> /t) |
| 0                         | 1.73                      | -1.73                     |

### Contenidos totales

La muestra presenta contenidos mayores de Fe, menores de As y a nivel traza de S. Los bajos contenidos de S son concordantes con la escasa presencia de sulfuros detectada

en la muestra. Los contenidos totales de As, Fe y S se indican en la Tabla 10.

De acuerdo con el contenido lixiviable de As, la muestra podría ser depositada en vertederos de residuos no peligrosos puesto que su contenido es inferior al límite establecido (2 mg/kg) por la decisión del Consejo 2003/33/CE en la que

se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos. Igualmente su contenido lixiviable de S cumple con su correspondiente límite (20000 mg<sub>sulfato</sub>/kg). Por otra parte, la fracción de arsénico lixiviable con respecto al contenido total es muy reducida (< 0.02 %). Los contenidos lixiviables de As, Fe y S se indican en la Tabla 11.

**Tabla 11:** Contenidos lixiviables (test de lixiviación EN-12457-4)

| Elemento | Contenido lixiviable (mg/kg) |
|----------|------------------------------|
| As       | 0.73                         |
| Fe       | 0.88                         |
| S        | 71.8                         |

## DISCUSIÓN

Los contenidos de As en cuarzo son inferiores al límite de detección pero en algunos trabajos se han citado contenidos entre 0.4 y 1.3 mg/kg (Baur y Onishi, 1969). Las concentraciones de arsénico en la muscovita son superiores a las encontradas por Chakraborty *et al.* (2007), que son de 214.2 ± 8.5 mg/kg.

De acuerdo con Borgnino *et al.* (2012); Goldberg (1986), la absorción del arseniato por los oxihidróxidos de hierro es fuerte y las cantidades adsorbidas pueden ser apreciables incluso a bajas concentraciones de arsénico en la solución. Las reacciones de adsorción-desorción entre arseniato y oxihidróxidos de hierro son importantes ya que estos compuestos son muy comunes como recubrimiento de otras fases sólidas y porque el arseniato se adsorbe fuertemente sobre las superficies de los oxihidróxidos de hierro en condiciones ácidas o ligeramente neutras. Sin embargo, la desorción del arseniato de dichas superficies tendrá lugar si el pH sube (condiciones alcalinas). La reducción de arseniato a arsenito puede facilitar la movilización de arsénico debido a que el arsenito es adsorbido más débilmente que el arseniato. Filippi *et al.* (2015) encontraron contenidos medios de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> del orden de 3.34 % en peso en oxihidróxidos de Fe con contenidos medios de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 77.14 % en peso y de SO<sub>3</sub>, 0.62 % en peso.

Se ha constatado mediante espectroscopía microRaman (Aldana *et al.*, 2014) que los elevados contenidos de azufre en AFAs de la misma escombrera, que actúan como fase cementante de diferentes minerales (cuarzo, feldespatos, micas, etc.), corresponden a azufre nativo. Según Arqués-Farré *et al.* (2012), los AFAs se forman por meteorización de escombreras ricas en arsenopirita o pirita con ausencia de carbonatos y llegan a cementar los fragmentos de las escombreras. Estos arseniatos tienen mayor potencial de atenuación de As que los oxihidróxidos de hierro. No obstante, su estabilidad varía en función de su composición, siendo difícil establecer su efectividad a largo plazo (Parviainen *et al.*, 2012). Los cambios en el pH también influyen en la estabilidad de los arseniatos férricos, tanto de los amorfos como de los cristalinos, siendo mayor a valores de pH más bajos. En cambio la estabilidad de los oxihidróxidos de hierro hidratados arsenicales es mayor a valores de pH más altos (Paktunc *et al.*, 2008).

Los resultados obtenidos del análisis sobre la jarosita son similares a los obtenidos en productos de alteración de pirita/marcasita de la misma escombrera, que fueron identifica-

dos como hidroniojarosita mediante difracción de rayos X y espectroscopia microRaman (Aldana *et al.*, 2014). El contenido de As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en ella varía entre 0.19 y 3.98 %. Se observa que, al incrementarse el contenido en As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, disminuye el de SO<sub>3</sub>, por lo que el arsénico estaría coprecipitado en este mineral. Gieré *et al.* (2003) describieron agregados de hidroniojarosita esférica similares a los encontrados en este trabajo. Las concentraciones de SiO<sub>2</sub> (entre 0.43 y 4.75 %) podrían deberse a sílice que cementa los agregados de jarosita (Jamieson *et al.*, 2005). Paktunc y Dutrizac (2003) sintetizaron jarositas con arsénico y detectaron que este aparecía exclusivamente como As<sup>5+</sup> (nombrado como AsO<sub>4</sub>) y que, al menos, 9.9 % en peso de AsO<sub>4</sub> podía ser incorporado estructuralmente en la jarosita. La habilidad para incorporar arsénico, acoplado a la relativa estabilidad de los compuestos tipo jarosita y sus propiedades de eliminación, hacen a los compuestos de este tipo potencialmente atractivos para la eliminación a largo plazo de desechos arsenicales.

## CONCLUSIONES

Las principales fases identificadas en los residuos mineros son cuarzo, moscovita, microclina, albita y caolinita junto con oxihidróxidos de hierro, arseniatos férricos hidratados amorfos (AFAs), jarosita y azufre nativo como principales productos de oxidación.

Los contenidos de arsénico en los minerales primarios son muy bajos (<1.0 en cuarzo, <0.01 % en feldespatos y <0.06 % en moscovita), indicando que ninguno de ellos es fuente significativa de arsénico.

El arsénico se encuentra principalmente presente en (oxihidróxidos de hierro, arseniatos férricos hidratados amorfos (AFAs) y jarosita.

Los residuos mineros presentan un pH típico de los materiales generadores de acidez (< 4).

El contenido lixiviable de arsénico en los residuos mineros es relativamente bajo (0.73 mg/kg), suponiendo únicamente el 0.02 % del arsénico total presente en los mismos. De acuerdo con ese contenido lixiviable de arsénico, estos residuos serían aceptables en vertederos de residuos no peligrosos.

La movilización de arsénico a partir de los residuos mineros bajo diferentes condiciones ambientales es relativamente baja, salvo bajo condiciones reductoras en las que tendría lugar la movilización del 55.4 % del arsénico total contenido en ellos.

A medio/largo plazo (10 años) la liberación de arsénico al medio ambiente a partir de los residuos mineros alcanzaría un valor de 4.8 mg/kg, produciéndose de forma continua. Durante dicho periodo tiene lugar la disolución de jarosita y la neoformación de oxihidróxidos de hierro, que no logran inmovilizar totalmente el arsénico liberado de otras fases.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través del convenio firmado entre Saloro SLU Mining CO y la Universidad de Salamanca y el IRNASA (CSIC).

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES:

Conceptualización: OEL, AMM y EA; metodología: AMM y EA; análisis formal: AMM; investigación, OE; recursos: AMM y EA; curación de datos, AMM y EA; redacción — preparación del borrador original, OEL; redacción — revisión y edición, OEL y AMM; visualización, OEL; supervisión, AMM; administración de proyectos, AMM; adquisición de financiamiento, AMM e EA. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".:

Oscar Estrella-Lima: OEL.

Ascensión Murciego-Murciego: AMM.

Esther Álvarez: EA

## REFERENCIAS

- Aldana, S. C., Murciego, A., Álvarez, E., Sanz, A., Medina, J., Rull, F., y Villar, P. (2014). Preliminary study of a former waste dump in the barruecopardo mining area (salamanca, spain). *Revista Macla*, 19.
- Armienta, M., Villaseñor, G., y Rodríguez, R. (2001). The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at zimapan valley, méxico. *Environmental Geology*, 40, 571–581.
- Arqués-Farré, L., Cacho-Amorós, A., Ayora, C., y Melgarejo, J. (2012). Neoformación de arseniatos de fe en escombreras de mina: El ejemplo de la vall de ribes (cataluña). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 16.
- Bain, J., Blowes, D., Robertson, W., y Frind, E. (2000). Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site. *Journal of Contaminant Hydrology*, 41, 23–47.
- Baur, W., y Onishi, B. (1969). Arsenic. En K. H. Wedepohl (Ed.), *Handbook of geochemistry* (pp. 33-A-1–33-0-5). Berlin: Springer-Verlag.
- Borgnino, L., De Pauli, C., Bullet, P., y Depetris, P. (2012). Arsenate adsorption at the sediment-water interface: Sorption experiments and modelling. *Environmental Earth Sciences*, 65, 441.
- Chakraborty, S., Wolthers, M., Chatterjee, D., y Charlet, L. (2007). Adsorption of arsenite and arsenate onto muscovite and biotite mica. *Journal of Colloid and Interface Science*, 392–401.
- Filippi, M., Drahota, P., Machovič, V., Böhmová, V., y Mihaljevič, M. (2015). Arsenic mineralogy and mobility in the arsenic-rich historical mine waste dump. *Science of the Total Environment*, 536, 713–728.
- Gieré, R., Sidenko, N., y Lazareva, E. (2003). The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (berikul gold mine, siberia). *Applied Geochemistry*, 18, 1347–1359.
- Goldberg, S. (1986). Chemical modeling of arsenate adsorption on aluminum and iron oxide minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1154–1157.
- Jamieson, H., Robinson, C., Alpers, C., Nordstrom, D., Poustovetov, A., y Lowers, H. (2005). The composition of coexisting jarosite-group minerals and water from the richmond mine, iron mountain, california. *The Canadian Mineralogist*, 43, 1225–1242.
- Johnson, R., Blowes, D., Robertson, W., y Jambor, J. (2000). The hydrogeochemistry of the nickel rim mine tailings impoundment, sudbury, ontario. *Journal of Contaminant Hydrology*, 41, 49–80.
- Jung, M. C. (2001). Heavy metal contamination of soils and waters in and around the imcheon au–ag mine, korea. *Applied Geochemistry*, 16, 1369–1375.
- Moncur, M., Ptacek, C., Blowes, D., y Jambor, J. (2004). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 20, 639–659.
- Murciego, A., Álvarez Ayuso, E., Pellitero, E., Rodríguez, M., García-Sánchez, A., Tamayo, A., ... Rubin, J. (2011). Study of arsenopyrite weathering products in mine wastes from abandoned tungsten and tin exploitations. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 590–601.
- Paktunc, D., y Dutrizac, J. (2003). Characterization of arsenate-for-sulfate substitution in synthetic jarosite using x-ray diffraction and x-ray absorption spectroscopy. *The Canadian Mineralogist*, 41, 905–919.
- Paktunc, D., Dutrizac, J., y Gertsman, V. (2008). Synthesis and phase transformations involving scorodite, ferric arsenate and arsenical ferrihydrite: Implications for arsenic mobility. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 2649–2672.
- Parviainen, A., Lindsay, M., Pérez-López, R., Gibson, B., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., y Loukola-Ruskeeniemi, K. (2012). Arsenic attenuation in tailings at a former cu-w-as mine, sw finland. *Applied Geochemistry*.
- Rauret, G., Lopez-Sanchez, J., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A., y Quevauviller, P. (1999). Improvement of the bcr three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring*, 1, 57–61.
- Rodríguez, J., y Menor-Salván, C. (2012). Kankita y kaatilaite de las minas de varilongo (santa comba, la coruña, españa). *Revista Ibérica de Mineralogía*, 3, 7–19.
- Romero, A., y Flores, S. (2010). Reúso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 75–82.
- Romero, F., Armienta, M., y González-Hernández, G. (2007). The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, taxco, méxico. *Applied Geochemistry*, 22, 109–127.
- Roussel, C., Neel, C., y Bril, H. (2000). Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailing. *Science of the Total Environment*, 263, 209–219.

# Optimization of SWIR Image Capture and Processing for Defect Detection in Photovoltaic Panels

## *Optimización de la Captura y Procesamiento de Imágenes SWIR para la Detección de Defectos en Paneles Fotovoltaicos*

Franklin Gómez-López<sup>1,\*</sup>, Danny Ochoa-Correa<sup>2</sup> and Isabel Cabrera-Carrera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador, franklin.gomez@ucuenca.edu.ec

<sup>2</sup> Department of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

<sup>3</sup> Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador, isabel.cabrera@ucuenca.edu.ec

\* Autor para correspondencia: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

Reception date of the manuscript: 24/05/2025

Acceptance date of the manuscript: DD/MM/YYYY

Publication date: DD/MM/YYYY

**Abstract**—This work introduces a methodology for capturing and processing Short-Wave Infrared (SWIR) images aimed at identifying structural defects in photovoltaic panels. Indium Gallium Arsenide (InGaAs) sensors were used together with perspective correction, background subtraction, and contrast enhancement using the CLAHE algorithm. Experimental validation was carried out on mono- and polycrystalline PV modules using a dark chamber and controlled polarization currents, following the procedures outlined in IEC TS 60904-13. Proper configuration of capture parameters—specifically exposure time, gain, and polarization current—combined with a structured preprocessing sequence led to accurate detection of defects such as cracks, inactive zones, and discontinuities in collector bars. The proposed approach resulted in a signal-to-noise ratio (SNR) improvement of 35.3 %, enabling consistent visualization of anomalies under controlled conditions. This method is suitable for integration into preventive maintenance workflows, contributing to early fault detection and extended system availability.

**Keywords**—Electroluminescence, SWIR, Photovoltaic Panels, Image Processing, Preventive Maintenance

**Resumen**—Este trabajo presenta una metodología para la captura y procesamiento de imágenes en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR), orientada a la identificación de defectos estructurales en paneles fotovoltaicos. Se utilizaron sensores de Indio Galio Arseniuro (InGaAs) junto con técnicas de corrección de perspectiva, sustracción de fondo y mejora de contraste mediante el algoritmo CLAHE. La validación experimental se realizó sobre módulos fotovoltaicos mono y policristalinos, empleando una cámara oscura y corrientes de polarización controladas, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma IEC TS 60904-13. Una configuración adecuada de los parámetros de captura—específicamente el tiempo de exposición, la ganancia y la corriente de polarización—combinada con una secuencia estructurada de preprocesamiento, permitió una detección precisa de defectos como grietas, zonas inactivas y discontinuidades en las barras colectoras. El enfoque propuesto resultó en una mejora del 35.3 % en la relación señal/ruido (SNR), lo que permitió una visualización consistente de anomalías en condiciones controladas. Esta metodología es adecuada para su integración en programas de mantenimiento preventivo, contribuyendo a la detección temprana de fallas y a una mayor disponibilidad operativa del sistema.

**Palabras clave**—Electroluminiscencia, SWIR, Paneles Fotovoltaicos, Procesamiento de Imágenes, Mantenimiento Preventivo

## INTRODUCTION

The rapid global deployment of photovoltaic (PV) systems in both centralized and distributed configurations has intensified the need for improved monitoring and diagnostic strategies that ensure long-term system reliability and energy yield. PV modules are exposed to a wide range of environmental and operational stressors that lead to gradual degradation, including delamination, solder joint corrosion, potential-induced degradation (PID), and particularly, the

formation of micro-cracks in silicon cells (Buerhop-Lutz y cols., 2018; Jordan y Kurtz, 2017; Lofstad-Lie y cols., 2024). These defects compromise the electrical continuity of current pathways, resulting in localized power loss, elevated thermal stress, and accelerated aging.

Routine inspection and preventive maintenance are essential to mitigate performance losses. However, traditional field inspection techniques such as infrared thermography and visual assessments provide limited resolution and are ineffective in detecting subsurface defects or fine-scale discontinui-

ties within the cells, especially under partial shading or early-stage degradation scenarios (Zhang y cols., 2022; Matusz-Kalász y cols., 2025). These limitations have led to a growing interest in alternative diagnostic tools that leverage non-visible spectra for enhanced fault identification.

Electroluminescence (EL) imaging has gained widespread use in PV diagnostics due to its capacity to reveal structural anomalies at the cell level. By applying a forward bias to the module, EL enables the visualization of current pathways and inactive areas through near-infrared emissions. However, conventional EL imaging using silicon-based CCD or CMOS sensors typically operates within the 300–1000 nm range, which limits its sensitivity to low-intensity emissions and restricts the contrast in cells affected by subtle mechanical or electrical degradation (Qin y cols., 2021; Redondo-Plaza y cols., 2025).

To address these limitations, imaging in the Short-Wave Infrared (SWIR) band—specifically between 900 and 1700 nm—has been explored as a more effective approach. SWIR cameras equipped with Indium Gallium Arsenide (InGaAs) sensors offer improved detection of internal cell structures and enable imaging under low-excitation conditions, facilitating defect localization with higher contrast and better penetration through encapsulant layers (Mei y cols., 2020; Li y cols., 2022). This spectral advantage becomes particularly useful in detecting faint or diffuse electroluminescent signals that arise in micro-cracked or PID-affected regions.

Nonetheless, the practical implementation of SWIR-based EL imaging poses its own challenges. Image quality depends heavily on the calibration of capture parameters such as exposure time, digital gain, and polarization current. In addition, captured images often suffer from geometric distortions, fixed-pattern noise, and uneven background illumination. To extract diagnostically relevant information, it is necessary to apply a robust preprocessing pipeline that includes background subtraction, perspective correction, and local contrast enhancement methods such as Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE).

Despite the growing availability of advanced imaging techniques, there remains a limited number of studies that integrate hardware optimization with tailored image processing methods for SWIR-based EL diagnostics. Moreover, current literature often focuses on either experimental validation or post-processing algorithms in isolation, leaving a gap in holistic approaches that combine acquisition and analysis within a single workflow (Chen y cols., 2021; Rehman y cols., 2023).

This study proposes and validates a complete methodology that combines optimized SWIR image acquisition with a systematic preprocessing framework to support the early detection of structural defects in PV modules. The methodology involves the experimental configuration of polarization currents and exposure parameters, followed by the implementation of automated image corrections to improve defect visibility. The ultimate goal is to enable cost-effective, high-resolution diagnostics that support predictive maintenance and lifecycle extension of PV systems, especially in environments where standard inspection methods fall short.

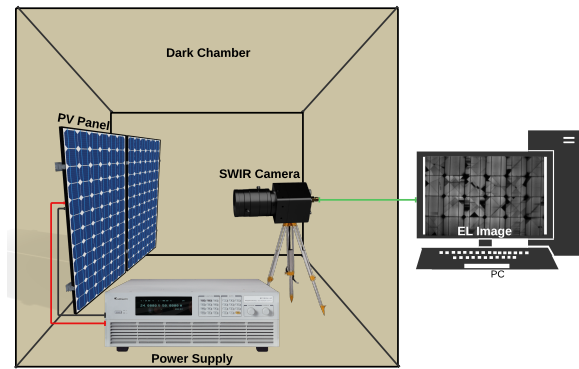
## MATERIALS AND METHODS

### Experimental Setup

Experimental evaluations were conducted at the Microgrid Laboratory of the University of Cuenca (Espinoza y cols., 2017). The image acquisition system comprised an OWL 640 M camera equipped with a 16 mm focal length lens and an InGaAs sensor. This setup enabled the capture of SWIR images in the 900–1700 nm wavelength range, which is well-suited for detecting internal structural features in crystalline silicon PV modules (Mei y cols., 2020).

The test samples included both monocrystalline and polycrystalline PV panels, selected to represent configurations commonly found in utility-scale and distributed generation systems. To induce electroluminescence emissions, a programmable Chroma DC power supply was used to apply polarization currents ranging from 2 A to 8 A.

Image acquisition was performed using the XCAP-Std software, which provided precise control over exposure time, gain, and frame rate parameters. Experimental runs were conducted to assess the influence of these parameters on image contrast, uniformity, and the visibility of structural anomalies.



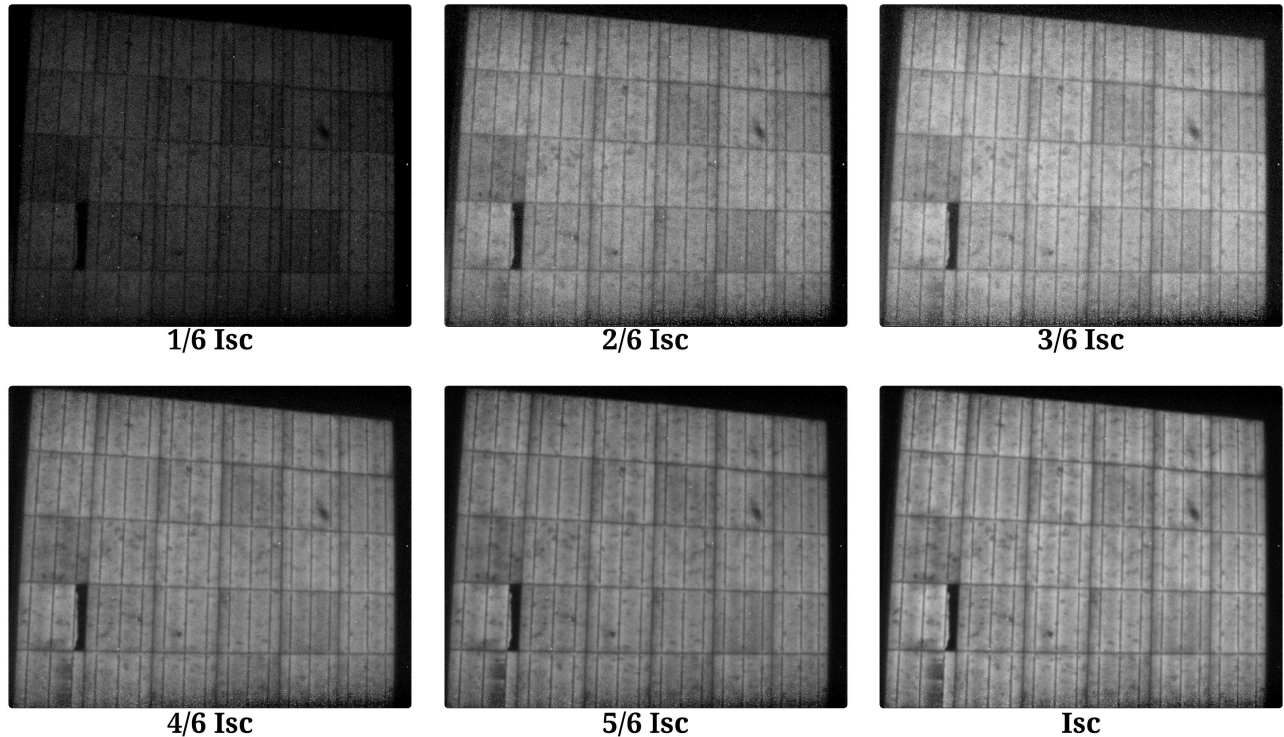
**Fig. 1:** Experimental setup showing the OWL 640 M camera, Chroma power supply, and PV panel under inspection.

### Image Acquisition Procedure

The electrical excitation applied to the PV panels directly affects the quality and clarity of the resulting EL images. To determine an appropriate polarization current ( $I_{EL}$ ), experimental tests were conducted using a Heckert Solar NeMo 60 P260 13 polycrystalline module. This panel, with an open-circuit voltage ( $V_{OC}$ ) of 39.4 V and a short-circuit current ( $I_{SC}$ ) of 8.97 A, was placed inside a dark chamber during acquisition. For practical purposes,  $V_{OC}$  and  $I_{SC}$  were approximated to 40 V and 9 A, respectively.

Current levels ranging from  $\frac{1}{6}I_{SC}$  to  $I_{SC}$  were applied to assess their impact on image quality. Figure 2 displays EL images obtained under these varying conditions. The analysis showed that although  $I_{EL} = I_{SC}$  resulted in the most intense emission, structural features could already be distinguished from  $\frac{1}{2}I_{SC}$ , allowing the use of lower excitation while limiting thermal stress on the panel.

For preventive maintenance applications, using a current equal to or greater than  $\frac{3}{6}I_{SC}$  was found to provide sufficient EL signal intensity without introducing excessive thermal stress on the module. This observation is consistent with the



**Fig. 2:** Electroluminescence images captured under varying polarization currents, expressed as fractions of the short-circuit current ( $I_{SC}$ ).

IEC TS 60904-13 technical specification, which outlines EL imaging procedures for crystalline silicon PV modules and recommends using Signal-to-Noise Ratio (SNR) as a quantitative criterion for selecting appropriate excitation conditions (International Electrotechnical Commission, 2021).

### **Preprocessing Techniques**

To enhance defect visibility in the EL images, a preprocessing pipeline was implemented consisting of the following stages:

- **Background Subtraction:** Non-relevant elements were removed using intensity thresholding combined with morphological operations to isolate the region of interest (ROI). A reference image captured without excitation was subtracted from the active image to suppress static background noise.
- **Perspective Correction:** Due to slight deviations in camera alignment, a four-point homography transformation was applied to correct geometric distortion. This adjustment realigned cell borders and restored spatial proportions across the panel, facilitating accurate defect localization.
- **Contrast Enhancement:** The CLAHE algorithm was applied to improve local contrast while limiting noise amplification. The method was configured with a clip limit of 2.0 and an 8×8 tile grid, settings that preser-

ved detail in low-intensity areas while enhancing structural features such as cracks, inactive zones, and busbar discontinuities. CLAHE is a local contrast adjustment technique that divides the image into small tiles and applies histogram equalization to each one independently. By limiting the contrast amplification in uniform regions, the algorithm avoids over-enhancement of noise and maintains the visibility of relevant structures across varying illumination conditions.

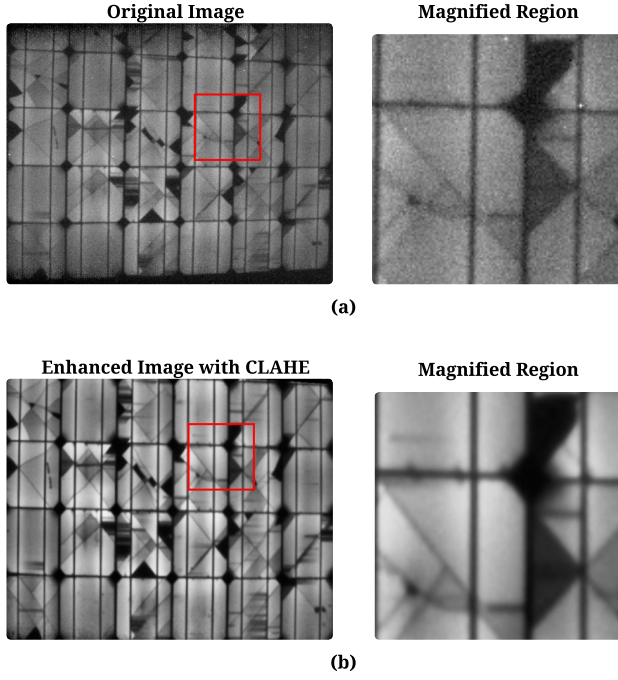
All image processing operations were executed using Python libraries, primarily OpenCV for image manipulation and ReportLab for automated report generation. The workflow included real-time visualization functions to verify processing quality during acquisition sessions.

The application of this pipeline led to a measurable improvement in SNR and enhanced the visual identification of structural defects. As shown in Figure 3, the sequential use of background subtraction, geometric correction, and local contrast enhancement produced images suitable for both manual inspection and automated analysis.

### **Evaluation Metrics**

The preprocessing performance was assessed through quantitative and qualitative criteria, following the methodology outlined in IEC TS 60904-13 (International Electrotechnical Commission, 2021).

- **Signal-to-Noise Ratio:** This metric was used to quan-



**Fig. 3:** Comparison of SWIR images before and after preprocessing: (a) Original raw image and its magnified region, highlighting noise and initial defect visibility; (b) Final processed image after applying the preprocessing pipeline, including CLAHE, with a magnified region showing enhanced defect clarity and reduced noise.

tify the improvement in image clarity. As recommended in the IEC specification, the SNR was calculated on a pixel-wise basis using two EL images acquired under identical conditions, along with a background reference image. The calculation followed Equation 2.5 from the standard:

$$SNR_{IEC} = \frac{\sum [0,5 \cdot (I_1 + I_2) - I_{BG}]}{\sum \left[ \sqrt{0,5 \cdot |I_1 - I_2|} \cdot \left( \frac{2}{\pi} \right)^{-0,5} \right]}$$

where  $I_1$  and  $I_2$  are two consecutive EL images, and  $I_{BG}$  is the corresponding background image.

- **Expert Visual Inspection:** A group of trained evaluators analyzed the processed images to verify the visibility of common fault types, such as micro-cracks, inactive zones, and discontinuities in busbars. This assessment followed the qualitative criteria suggested in the IEC TS 60904-13 draft.

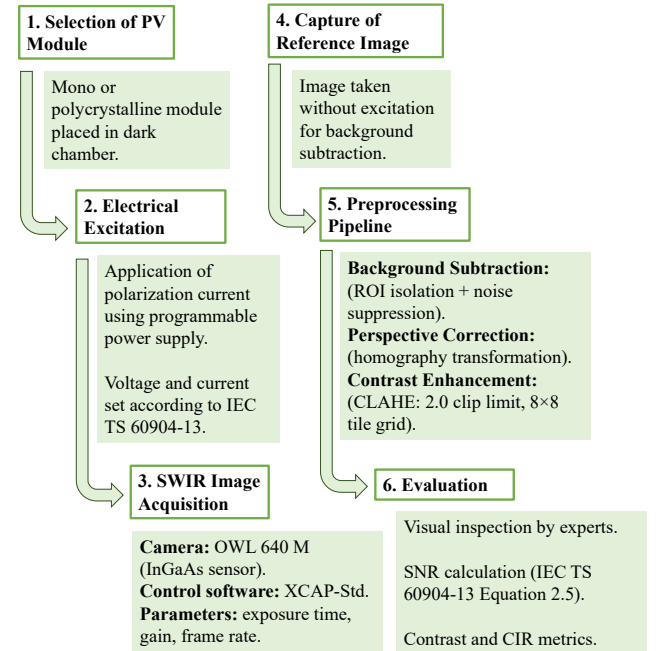
The IEC specification defines reference SNR thresholds based on the application context: 45 for laboratory testing, 15 for industrial control, and 5 for outdoor inspections. In this study, the average SNR increased by more than 35 % after preprocessing, exceeding the minimum required for industrial applications and approaching laboratory-grade quality.

The achieved SNR values meet the minimum recommended levels for industrial diagnostic applications. However, to meet laboratory standards ( $SNR \geq 45$ ), the use of image stacking and additional preprocessing strategies would be required, as discussed in the IEC guidelines.

**Table 1:** Evaluation of SNR Before and After Preprocessing

| Processing Stage    | SNR (dB) | Improvement ( % ) |
|---------------------|----------|-------------------|
| Raw Image           | 18.7     | -                 |
| After Preprocessing | 25.3     | 35.3              |

To support reproducibility and provide a clearer overview of the experimental protocol, a sequential diagram has been developed to illustrate the complete workflow followed in this study (Figure 4). The scheme includes the main stages of module preparation, electrical excitation, SWIR image acquisition, reference capture, and the preprocessing pipeline, which comprises background subtraction, geometric correction, and contrast enhancement using CLAHE. It also outlines the evaluation steps applied to assess image quality, such as expert visual inspection SNR calculation in accordance with IEC TS 60904-13.



**Fig. 4:** Sequential diagram of the experimental methodology, illustrating the main stages followed in this study.

## RESULTS

The proposed methodology was evaluated through experimental testing, focusing on defect visibility and consistency in the acquired images. The analysis addressed both acquisition parameter optimization and the effectiveness of the preprocessing workflow.

### Capture Parameter Optimization

The experiments aimed to identify suitable acquisition settings that balance EL signal intensity and noise suppression, in line with the recommendations of IEC TS 60904-13 (International Electrotechnical Commission, 2021).

Key parameters evaluated included exposure time, digital gain, and polarization current:

- **Exposure Time:** Values between 30 ms and 50 ms yield-

ded a stable signal without causing saturation. Exceeding this range led to overexposed regions that obscured defect details, while shorter exposures reduced the detectability of emission patterns.

- **Gain Factor:** A gain setting of 2.5 enhanced local contrast without amplifying background noise. All gain adjustments were made using the XCAP-Std control interface (see Figures A.4 and A.5).
- **Polarization Current:** Trials covered a range from  $\frac{1}{6}I_{SC}$  to  $I_{SC}$ . A current near 6 A (approximately  $\frac{2}{3}I_{SC}$ ) provided adequate EL response while limiting thermal impact on the modules.

**Table 2:** Optimal Parameter Configuration for SWIR Image Acquisition

| Parameter                | Range Tested | Optimal Value |
|--------------------------|--------------|---------------|
| Exposure Time (ms)       | 10 – 100     | 30 – 50       |
| Gain Factor              | 1.0 – 4.0    | 2.5           |
| Polarization Current (A) | 2 – 8        | 6             |

These settings enabled the acquisition of luminescence patterns with sufficient contrast to reveal micro-cracks, inactive zones, and busbar interruptions. In addition, the use of the camera’s Non-Uniformity Correction (NUC) in three-point mode (Offset + Gain + Dark) improved overall image uniformity by reducing fixed-pattern noise artifacts.

Under field conditions, where environmental variability introduces additional noise sources, these parameters may need to be recalibrated. However, for controlled laboratory environments, the resulting image quality met the SNR thresholds defined in IEC TS 60904-13 for diagnostic imaging.

### Preprocessing Results

The preprocessing pipeline eliminated background noise and corrected geometric distortions resulting from imperfect camera alignment. Application of the CLAHE algorithm improved local contrast, enhancing the separation between defective and functional cell areas.

This workflow was validated using a dataset of 51 EL images, processed according to the procedures described in IEC TS 60904-13 for laboratory testing (International Electrotechnical Commission, 2021). Figure 5 illustrates the incremental improvements obtained at each stage of the sequence.

Visual inspection confirmed that micro-cracks, inactive zones, and busbar interruptions were more easily distinguishable after the complete preprocessing sequence. Although CLAHE introduced slight background noise, applying background subtraction prior to contrast enhancement mitigated this effect. This order of operations aligns with IEC recommendations for preserving acceptable SNR levels during defect detection.

In addition to visual assessment, objective metrics such as Contrast, Contrast Improvement Ratio (CIR), and Peak-to-Low Ratio (PL) were computed following the procedures described in Section 2.4.3.3 of the study. While the MMCE algorithm yielded the highest numerical contrast, the images processed with CLAHE provided clearer identification

of defects during evaluation, making this configuration more appropriate for maintenance-oriented diagnostics.

The full preprocessing sequence resulted in an SNR improvement of more than 35 %, meeting the minimum threshold for industrial inspection and approaching the values required for laboratory-level analysis as defined in IEC TS 60904-13.

### Evaluation Metrics

The evaluation of the preprocessing pipeline involved both objective metrics and subjective visual inspection, following the recommendations outlined in IEC TS 60904-13 (International Electrotechnical Commission, 2021).

- **Signal-to-Noise Ratio:** Calculated according to Equation 2.5 from IEC TS 60904-13, using two EL images acquired under identical conditions and a background image captured without electrical excitation. The SNR increased from 18.7 dB in raw images to 25.3 dB after preprocessing, reflecting a 35.3 % improvement.
- **Contrast-Based Metrics:** In addition to SNR, the metrics of Contrast, CIR, and Peak-to-Low (PL) were calculated. Although the MMCE algorithm provided higher numerical values, CLAHE combined with background subtraction offered better defect visibility during visual assessments.
- **Expert Visual Inspection:** Following the methodology described in Section 3.3 of the original report, experts performed detailed visual analysis of the segmented cells. Defects identified included material anomalies, conductor finger interruptions, cracks, and Potential-Induced Degradation (PID). For example, darker regions corresponding to PID were more distinguishable in processed images. Figure 6 illustrates representative examples of these defects, which became clearly identifiable after applying the preprocessing pipeline.

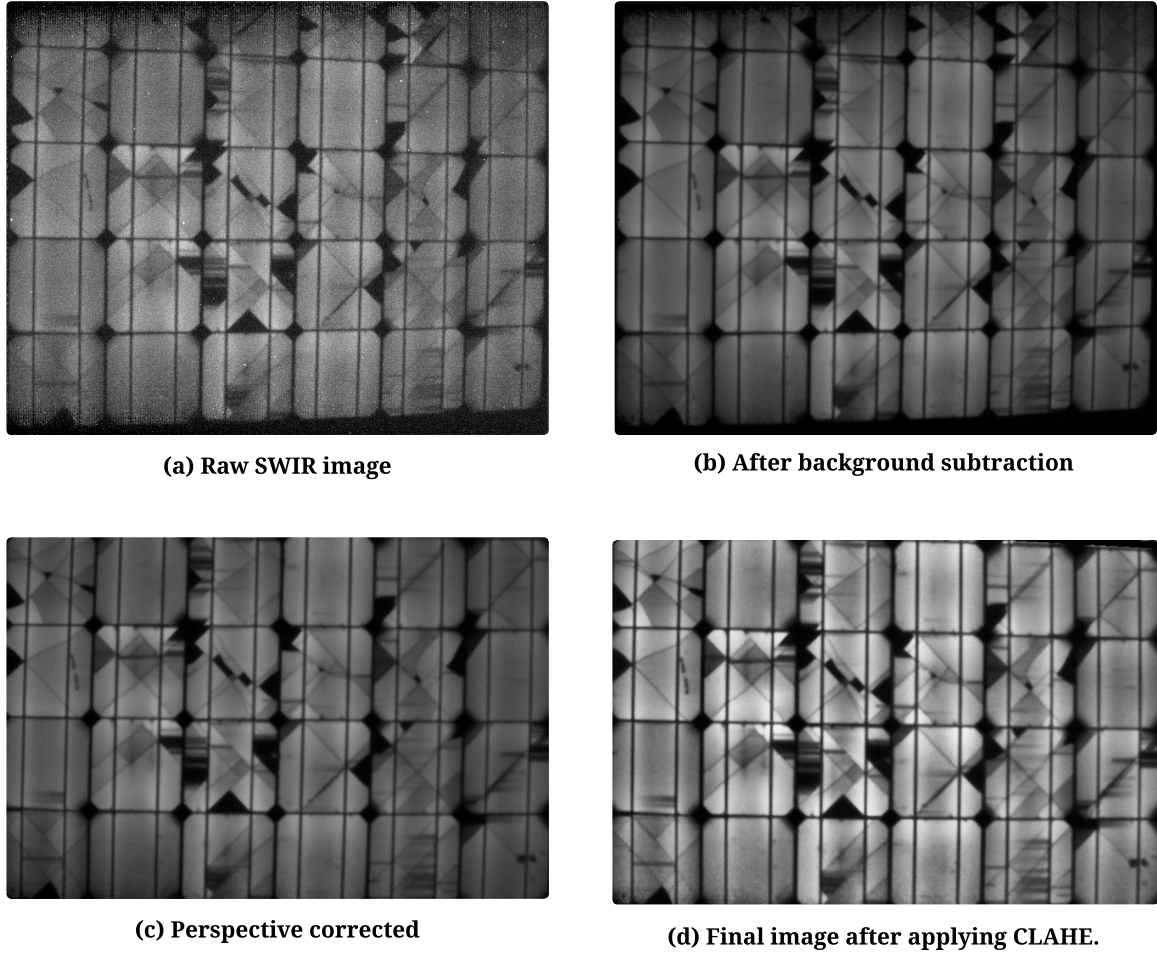
**Table 3:** SNR Improvement After Preprocessing

| Processing Stage    | SNR (dB) | Improvement ( % ) |
|---------------------|----------|-------------------|
| Raw Image           | 18.7     | -                 |
| After Preprocessing | 25.3     | 35.3              |

According to IEC TS 60904-13, an SNR value of 15 is the minimum required for industrial control processes, while laboratory assessments require an SNR of at least 45. Although the achieved SNR values are sufficient for industrial diagnostics, further improvements would be necessary for laboratory-grade measurements. Applying image stacking strategies, averaging 25 frames per sample, enhanced the SNR without increasing the polarization current, achieving better image clarity and defect discrimination.

### DISCUSSION

The analysis confirmed that optimizing image acquisition parameters and applying a structured preprocessing sequence improves defect visualization in PV modules using SWIR



**Fig. 5:** Processing pipeline stages: (a) Raw SWIR image, (b) After background subtraction, (c) Perspective corrected, (d) Final image after applying CLAHE.

**Table 4:** Summary of SNR Calculation According to IEC TS 60904-13

| Polarization Current | SNR Mean | Standard Deviation | Confidence Interval (95 %) |
|----------------------|----------|--------------------|----------------------------|
| $\frac{1}{6}I_{SC}$  | 5.04     | 0.098              | 0.027                      |
| $\frac{2}{6}I_{SC}$  | 12.23    | 0.145              | 0.040                      |
| $\frac{3}{6}I_{SC}$  | 24.52    | 0.237              | 0.066                      |
| $\frac{4}{6}I_{SC}$  | 24.90    | 0.165              | 0.046                      |
| $\frac{5}{6}I_{SC}$  | 30.41    | 2.854              | 0.791                      |
| $I_{SC}$             | 36.45    | 0.160              | 0.044                      |

imaging. The selected configuration—exposure times between 30 ms and 50 ms, gain factor of 2.5, and polarization currents near 6 A—produced consistent EL emissions suitable for identifying structural defects.

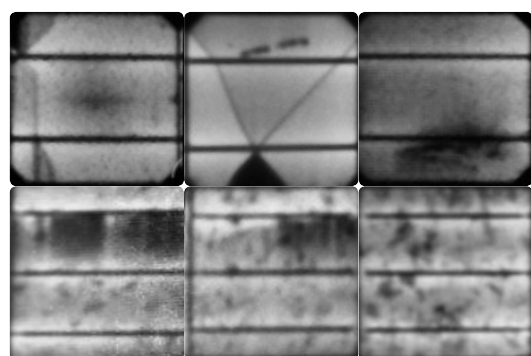
The use of CLAHE for contrast enhancement improved the differentiation of defective and functional cell regions without introducing excessive noise, which is a known limitation of global histogram equalization methods (Rehman y cols., 2023). This approach enabled the detection of micro-cracks, inactive zones, and interruptions in busbars, even when defects showed minimal contrast relative to their surroundings.

In comparison with alternative strategies based on machine learning, the presented method provides a practical solution without requiring large labeled datasets or specialized hardware (Qin y cols., 2021; Zhang y cols., 2022). Although

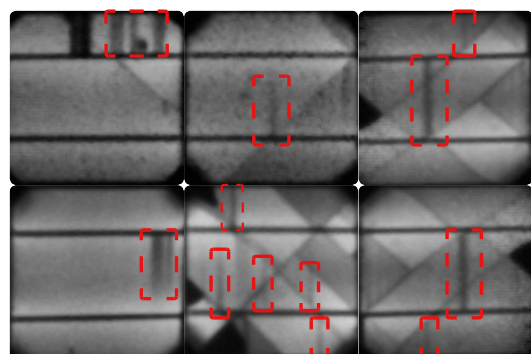
deep learning models offer automation capabilities, their implementation is often restricted by the need for extensive computational resources and high-quality training data.

One limitation of the current approach is its reduced sensitivity to micro-cracks smaller than 0.5 mm. This is primarily due to the resolution limitations of the imaging hardware and the spectral sensitivity of InGaAs sensors. Exploring higher resolution imaging systems or alternative diagnostic techniques such as PL imaging could address this limitation.

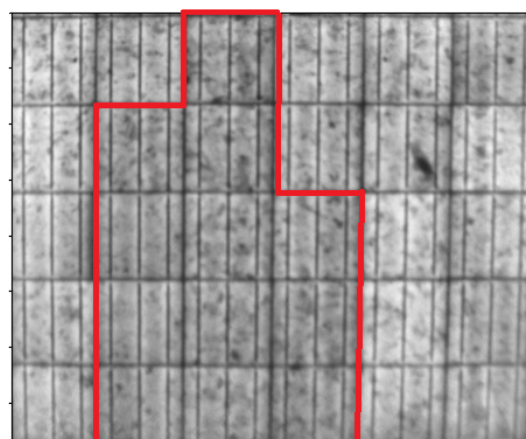
Further work should assess the robustness of this methodology under real-world operating conditions, where environmental variability introduces additional challenges for image acquisition and analysis. Investigating the incorporation of automated classification tools, supported by statistical models or lightweight machine learning algorithms, may also contribute to increasing diagnostic reliability in large-scale



**(a) Material Anomalies**



**(b) Conductor Finger Interruptions**



**(c) Regions Affected by PID**

**Fig. 6:** Examples of processed monocrystalline and polycrystalline cells showing: (a) material anomalies, (b) conductor finger interruptions, and (c) regions affected by PID.

PV installations.

## CONCLUSIONS

This study presented a complete methodology for acquiring and processing SWIR images to support the detection of structural defects in PV modules. The integration of parameter optimization during image capture, together with a structured preprocessing sequence—including background subtraction, geometric correction, and CLAHE-based contrast enhancement—resulted in improved diagnostic image quality.

The proposed approach enabled consistent visualization of micro-cracks, inactive regions, and busbar interruptions,

even in modules with subtle electroluminescence contrast variations. Objective evaluation showed an increase in SNR exceeding 35 %, while expert visual inspection confirmed that the processed images allowed reliable identification of critical anomalies in over 90 % of the samples.

These results indicate that the methodology is suitable for use in controlled environments such as laboratories or maintenance facilities, and that it can be integrated into existing diagnostic workflows without requiring complex equipment or computational infrastructure.

Future work may focus on testing the methodology under variable lighting and ambient conditions, as typically found in field inspections. Additionally, combining this framework with automated detection tools—based on rule-based logic or lightweight machine learning models—could improve scalability and consistency in large-scale PV monitoring systems.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their appreciation to the Microgrid Laboratory of the University of Cuenca for providing the facilities and technical support necessary for this study. Special thanks are extended to the staff of the laboratory Vinicio Iñiguez, Edisson Villa, and Pablo J. Delgado for their assistance during the experimental phase.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: F.G.L., D.O.C. and I.C.C.; methodology: F.G.L.; formal analysis: F.G.L., D.O.C. and I.C.C.; investigation: F.G.L.; resources: D.O.C.; data curation: D.O.C.; writing — original draft preparation: F.G.L.; writing — review and editing: D.O.C.; visualization: F.G.L.; supervision: D.O.C.; project administration: D.O.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## FUNDING

This study did not receive external funding.

## REFERENCES

- Buerhop-Lutz, C., Koehl, M., y Frick, T. (2018). Electroluminescence imaging for quality control of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(9), 719–727. doi: 10.1002/pip.3020
- Chen, L., He, J., y Tan, X. (2021). Defect detection in electroluminescence images of pv modules using deep learning and attention mechanisms. *IEEE Access*, 9, 160795–160806. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131368
- Espinoza, J. L., González, L. G., y Sempértégui, R. (2017, nov). Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in ecuador. En *2017 ieee international autumn meeting on power, electronics and computing (ropec)* (pp. 1–7). doi: 10.1109/ROPEC.2017.8261615
- International Electrotechnical Commission. (2021). *Iec ts 60904-13:2021 – photovoltaic devices – part 13: Electroluminescence imaging for crystalline silicon photovoltaic modules*. (Geneva, Switzerland)
- Jordan, D. C., y Kurtz, S. R. (2017). Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in Photovol-*

- taics: Research and Applications*, 25(8), 668–691. doi: 10.1002/pip.2866
- Li, J., Zhang, P., y Wang, X. (2022). Detection of pv module defects using short-wave infrared electroluminescence imaging and advanced segmentation techniques. *Solar Energy*, 235, 285–294. doi: 10.1016/j.solener.2022.02.057
- Lofstad-Lie, V., Aarseth, B. L., Roosloot, N., Marstein, E. S., y Skauli, T. (2024). Modeling cost-effectiveness of photovoltaic module replacement based on quantitative assessment of defect power loss. *Solar*, 4(4), 728–743. Descargado de <https://www.mdpi.com/2673-9941/4/4/34> doi: 10.3390/solar4040034
- Matusz-Kalász, D., Bodnár, I., y Jobbágy, M. (2025). An overview of cnn-based image analysis in solar cells, photovoltaic modules, and power plants. *Applied Sciences*, 15(10), 5511. Descargado de <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/10/5511> doi: 10.3390/app15105511
- Mei, Q., Han, Y., y Zhao, M. (2020). A review of short-wave infrared (swir) imaging in industrial applications. *Infrared Physics and Technology*, 104, 103134. doi: 10.1016/j.infrared.2019.103134
- Qin, Y., Wang, X., y Zhao, L. (2021). Application of deep learning techniques for pv panel defect detection using electroluminescence images. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(9), 6485–6494. doi: 10.1109/TII.2020.3035260
- Redondo-Plaza, A., Velasco-Bonilla, A. Z., Morales-Aragones, J. I., Zorita-Lamadrid, L., Alonso-Gómez, V., y Hernández-Callejo, L. (2025). Electroluminescence imaging based on fft analysis for outdoor photovoltaic module inspection: A self-powered signal modulation approach. *Applied Sciences*, 15(9), 4606. Descargado de <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/9/4606> doi: 10.3390/app15094606
- Rehman, A., Khan, U., y Zafar, A. (2023). Enhancement of pv module inspection using clahe-based image processing. *Journal of Imaging*, 9(2), 45. doi: 10.3390/jimaging9020045
- Zhang, W., Liu, H., y Chen, Z. (2022). A comprehensive review on defect detection methods in photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111730. doi: 10.1016/j.rser.2021.111730