

❑ Evaluación de la seguridad del tráfico MQTT con cifrado y sin él en un entorno simulado 5G-IoTL.

❑ Model for energy management of a hybrid generation system connected to the grid.

❑ Modelo de mercado eléctrico en el escenario de integración energética regional para América Latina?

❑ Análisis de factibilidad para implementar soluciones de autogeneración en usuarios no regulados en Colombia.

SECCIÓN ESPECIAL

VII Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras

❑ Desarrollos recientes de la normativa geotécnica.

❑ Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas parcialmente saturados.

❑ Uso innovador de geosintéticos en columnas encamisadas con geotextil para cimentaciones en diques sobre suelos blandos.

❑ Excavación y sostenimiento en una terraza aluvial

Micropilotes: resumen teórico y dos casos en Bogotá

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

VOCALES SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
MANUEL GARCÍA LÓPEZ
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR
MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
RICARDO SALAZAR FERRO
MARIANA SANDINO ULLOA
JAIRO URIBE ESCAMILLA
JORGE ENRIQUE CLAVIJO RAMÍREZ
(representante de los profesores)
DAVID STEVEN OCHOA VÉLEZ
(representante de los estudiantes)

RECTORA MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ

SECRETARIA GENERAL PATRICIA SALAZAR PERDOMO

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

N.º 139 - septiembre-diciembre de 2025 - Cuatrimestral - Bogotá, Colombia

ISSN 3114-9081 (en línea)

DIRECTORA PhD. ING. MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

COMITÉ EDITORIAL PhD. ING. LUIS DANIEL BENAVIDES NAVARRO
PhD. ING. GERALD A. CORZO PÉREZ
(Profesor Asociado IHE Delft, Países Bajos)
PhD. ING. JUAN NICOLÁS GONZÁLEZ SARMIENTO
(Postdoctoral Research KAPSARC, Arabia Saudita)
PhD. ING. ANDRÉS FELIPE GUZMÁN
(Investigador Senior. KAPSARC, Arabia Saudita)
PhD. ING. LORENA REYES-RUBIANO
(Postdoctoral Researcher, RWTH Aachen University, Alemania)

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**

JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA

CORRECCIÓN DE ESTILO

ELKIN RIVERA GÓMEZ

TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS

DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59

TEL.: (60-1) 668 3600, EXT. 533

revista@escuelaing.edu.co

BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS.
SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5-6 / EDITORIAL

Ingeniería entre sistemas inteligentes e infraestructura física: articulaciones desde la investigación y la práctica profesional

Mónica Marcela Suárez Pradilla

7-18

Evaluación de la seguridad del tráfico MQTT con cifrado y sin él en un entorno simulado 5G-IoT

María Fernanda Montero - Armando Luis Correa Murcia - Yennifer Dayanna Gómez Rodríguez

En este artículo se analizan vulnerabilidades en un entorno de simulación 5G para evaluar la seguridad en la comunicación de dispositivos IoT (internet de las cosas) mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Se diseñó un laboratorio con mensajes legítimos de un IoT y ataques simulados, empleando tráfico sin cifrado y protegido con AES-CFB (Estándar de Cifrado Avanzado en Modo de Retroalimentación de Cifrado).

19-27

Model for energy management of a hybrid generation system connected to the grid

Nicolás Alejandro Rojas Melo - Daniel José González Tristanco

Ante la necesidad de brindar el servicio de energía eléctrica en lugares como comunidades aisladas donde no se puede construir una subestación eléctrica, para lograr el objetivo se utilizó la deducción e implementación de dos perfiles de carga: residencial e industrial, los cuales se organizarían como carga resistiva para un sistema híbrido formado por dos módulos solares, un aerogenerador de eje vertical, dos baterías de plomo-ácido y la red eléctrica.

29-38

Modelo de mercado eléctrico en el escenario de integración energética regional para América Latina

Yefer Andrés Pérez Ríos - Agustín Rafael Marulanda Guerra

La integración energética impulsa el desarrollo de modelos de energía transnacionales en el esquema vinculante de agentes de generación y transmisión de energía. Latinoamérica y el Caribe cuenta con reservas de petróleo, gas natural, carbón mineral, potenciales hidroeléctricos y solares —incluido el viento—, pero su capacidad instalada de generación eléctrica es naciente, así como el consumo de electricidad.

39-58

Análisis de factibilidad para implementar soluciones de autogeneración en usuarios no regulados en Colombia

Cristian L. Manrique Pérez - Javier Andrés Ruiz Garzón - Josimar Tello Maíta

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo técnico-financiero para evaluar la factibilidad de implementar soluciones de autogeneración solar fotovoltaica en usuarios no regulados (UNR) en Colombia, fundamentado en la regulación vigente y las condiciones del mercado energético nacional. Se analizan los riesgos, motivadores y aspectos técnicos de la generación solar, así como las alternativas contractuales disponibles: contrato EPC (Engineering, Procurement, and Construction) y acuerdo PPA (Power Purchase Agreement).

SECCIÓN ESPECIAL

VII Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras

61-68

Desarrollos recientes de la normativa geotécnica

Héctor Parra Ferro

A lo largo del presente artículo se discute la relación entre la normativa geotécnica y estructural, así como la influencia de eventos académicos, institucionales y técnicos en la construcción progresiva de los marcos regulatorios vigentes. Desde una perspectiva reflexiva y técnica, se destacan los alcances y limitaciones de la normativa, subrayando la necesidad de interpretar los códigos como herramientas de apoyo al juicio profesional y no como sustitutos del análisis ingenieril.

69-74

Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas parcialmente saturados

Catalina Lozada - Cristian Mendoza - Hermes Vacca - Esteban Guacaneme

En este artículo se evalúa la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas en condiciones de saturación parcial, incorporando explícitamente el efecto de la succión matricial en el comportamiento mecánico del suelo. A partir de resultados experimentales y del análisis de parámetros geotécnicos relevantes, se examina la influencia del grado de saturación en la resistencia al corte y en la capacidad portante última de zapatas superficiales.

75-80

Uso innovador de geosintéticos en columnas encamisadas con geotextil para cimentaciones en diques sobre suelos blandos

Carlos M. Rodríguez

En este artículo se analiza el uso de columnas encamisadas con geotextil como una solución innovadora para el mejoramiento del terreno en suelos muy blandos, con aplicación particular en obras de infraestructura lineal y de contención. Se describen los principios de funcionamiento del sistema, el papel del geosintético en la confinación del material granular y los criterios generales de diseño que gobiernan su comportamiento mecánico.

81-90

Excavación y sostenimiento en una terraza aluvial

José Vicente Amórtegui Gil - Johan Camilo Garzón Cubides

En este artículo se analiza una intervención de excavación y sostenimiento desarrollada en una terraza aluvial, caracterizada por condiciones geotécnicas complejas, asociadas a materiales heterogéneos y actividad tectónica reciente.

91-100

Micropilotes: resumen teórico y dos casos en Bogotá

Luis Fernando Orozco - Marcela Salcedo - Juan Sebastián Ruiz Hernández

En este artículo se presenta un resumen teórico sobre el comportamiento y diseño de micropilotes, complementado con el análisis de dos casos de aplicación en la ciudad de Bogotá. Se describen los principios fundamentales del sistema, los mecanismos de transferencia de carga y los criterios generales de cálculo asociados a este tipo de cimentación profunda, al tiempo que se destaca su versatilidad en obras de refuerzo, submuración y control de asentamientos.

101 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Ingeniería entre sistemas inteligentes e infraestructura física: articulaciones desde la investigación y la práctica profesional

MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

PhD. M.Sc. Gestión y Valoración Urbana de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Profesora del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

monica.suarez@escuelaing.edu.co

La ingeniería contemporánea enfrenta un escenario caracterizado por la simultaneidad de escalas. Mientras una parte creciente de los sistemas de infraestructura se digitaliza y opera mediante redes de información, algoritmos y modelos predictivos, la base material sobre la cual se fundamenta la sociedad continúa dependiendo de procesos físicos complejos, asociados al territorio, los materiales naturales y la construcción. Esta doble condición exige integrar conocimientos provenientes tanto de la ingeniería de sistemas y la energía como de la ingeniería civil y, en particular, de la geotecnia.

En el presente número de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* se refleja, precisamente, esa convergencia, como se puede ver en la primera parte de esta edición, en la cual se reúnen trabajos de investigación académica en los que se abordan problemas relacionados con la transformación tecnológica de la infraestructura.

En el primer artículo se analiza la seguridad de las comunicaciones en entornos 5G e internet de las cosas mediante la evaluación experimental del protocolo MQTT con cifrado y sin él. A lo largo del estudio se demuestra que la confidencialidad de los datos no garantiza por sí sola la seguridad del sistema, al tiempo que se evidencia la necesidad de implementar mecanismos adicionales de autenticación e integridad para proteger redes altamente interconectadas.

En el segundo artículo se presenta un modelo de gestión energética para un sistema híbrido conectado a la red, basado en la caracterización de perfiles de carga y el uso de modelos predictivos para estimar la generación de fuentes renovables. En la investigación se integran la simulación técnica y la evaluación económica, lo que permite mostrar la viabilidad de soluciones energéticas aplicables a zonas con restricciones de suministro eléctrico.

En el tercer artículo se propone un modelo matemático para la integración del mercado eléctrico regional en Latinoamérica mediante la optimización del despacho económico, considerando restricciones de red y priorización de energías renovables. Los resultados evidencian que la coordinación energética regional ayuda a mejorar la eficiencia del sistema y favorece la sostenibilidad del suministro eléctrico.

El cuarto trabajo complementa esta línea al analizar el comportamiento de sistemas energéticos en distintos escenarios de operación y demanda, e integrar herramientas de simulación que permiten evaluar desempeño técnico y financiero de infraestructuras energéticas modernas.

Estos artículos representan la ingeniería que gestiona información, energía y conectividad; sin embargo, toda infraestructura digital y energética depende inevitablemente de un soporte físico: el terreno. Y es un soporte

clave, pues sobre este se cimentan las edificaciones, las redes de transporte, las plantas de generación y las obras hidráulicas. Una vez reconocida dicha condición, en la segunda parte de este número se presenta una sección especial, derivada del VII Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras.

Esta sección especial consta de seis artículos en los que se documentan experiencias de diseño, construcción, modelación y normativa en ingeniería estructural y geotécnica.

En un primer grupo de trabajos se abordan soluciones constructivas en contextos reales. En el estudio sobre micropilotes se documenta su comportamiento como alternativa de cimentación en condiciones urbanas complejas. De manera complementaria, en el análisis de excavaciones en terrazas aluviales se examinan los criterios de estabilidad y sostenimiento requeridos para intervenciones en depósitos heterogéneos, donde la secuencia constructiva resulta determinante para la seguridad de la obra.

Así mismo, se presenta el uso de columnas encamisadas con geotextil como técnica de mejoramiento del terreno en suelos blandos; posteriormente, se evalúa su desempeño en materia de asentamientos y capacidad portante, y se evidencia su eficiencia frente a métodos tradicionales de estabilización.

Desde el punto de vista analítico, se incluyen investigaciones acerca de la capacidad portante en suelos volcánicos parcialmente saturados y sobre la influencia de la profundidad de pilotaje en la respuesta sísmica del sitio, las cuales incorporan modelación avanzada e interacción suelo-estructura para reducir la incertidumbre en el diseño geotécnico.

Finalmente, en el artículo sobre evolución de la normativa geotécnica en Colombia se revisa el desarrollo de los códigos de diseño desde sus orígenes hasta su consolidación actual, y se destaca que la normativa constituye una herramienta de apoyo al juicio profesional y no un sustituto del análisis ingenieril.

La publicación de estos trabajos trasciende el carácter de memorias de evento. Su adaptación al formato de artículo científico permite no solo someter experiencias de práctica profesional al escrutinio académico, sino también preservar un conocimiento técnico que, de otro modo, permanecería restringido a la obra o a la consultoría. Así las cosas, la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* actúa como un puente entre la investigación universitaria y la experiencia especializada de la práctica ingenieril.

En el número 139 se muestra, así, una realidad fundamental: la ingeniería actual no se puede entender únicamente desde la digitalización ni exclusivamente desde la construcción. Los sistemas inteligentes requieren infraestructura física, y las obras civiles dependen cada vez más de modelación avanzada, monitoreo y análisis de datos. La integración de ambas dimensiones constituye uno de los principales retos de la formación y del ejercicio profesional del ingeniero.

La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* reafirma su propósito de ser un espacio de convergencia entre diferentes áreas del conocimiento ingenieril, orientado a promover la difusión tanto de investigación académica como de experiencia técnica especializada. En un contexto de creciente complejidad tecnológica y territorial, esta articulación resulta esencial para fortalecer la toma de decisiones informada, la seguridad de las obras y la sostenibilidad de la infraestructura.

Evaluación de la seguridad del tráfico MQTT con cifrado y sin él en un entorno simulado 5G-IoT

Evaluation of MQTT Traffic Security with and without Encryption in a Simulated 5G-IoT Environment

ARMANDO LUIS CORREA MURCIA¹ - YENNIFER DAYANNA GÓMEZ RODRÍGUEZ² -
MARÍA FERNANDA MONTERO³

1. Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

3. Magíster en Ingeniería Electrónica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4571-8094>

armando.correa@mail.escuelaing.edu.co - yennifer.gomez-r@mail.escuelaing.edu.co -
maria.montero-m@escuelaing.edu.co

Recibido: 06/06/2025 Aceptado: 22/08/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analizan vulnerabilidades en un entorno de simulación 5G para evaluar la seguridad en la comunicación de dispositivos IoT (internet de las cosas) mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Se diseñó un laboratorio con mensajes legítimos de un IoT y ataques simulados, empleando tráfico sin cifrado y protegido con AES-CFB (Estándar de Cifrado Avanzado en Modo de Retroalimentación de Cifrado). El analizador clasificó mensajes, verificó respuestas del broker y evaluó medidas de seguridad. Los resultados evidencian que el cifrado protege parcialmente, pero no evita ataques sin autenticación robusta, destacando la necesidad de mecanismos como autenticación mutua y firmas digitales.

Los resultados muestran que, aun cuando el cifrado aporta confidencialidad, no evita ataques sin autenticación robusta. En el escenario cifrado, el 66,20 % del tráfico correspondió a ataques, frente al 48,80 % en el escenario sin cifrado, lo que revela que el cifrado no reduce la proporción de tráfico malicioso y, de hecho, incrementó en 17,4 % la aceptación de mensajes de ataque respecto al escenario sin cifrado. Adicionalmente, la tasa de envío disminuyó de 19,02 msg/s sin cifrado a 13,98 msg/s con cifrado, lo que evidencia un impacto del proceso criptográfico en el rendimiento.

En conclusión, la protección efectiva de IoT en 5G requiere combinar cifrado con autenticación mutua, firmas digitales y mecanismos avanzados de integridad. Los resultados ofrecen una base replicable para entornos de enseñanza en ciberseguridad IoT.

Palabras claves: 5G, IoT, security, MQTT, encryption, vulnerabilities, attacks.

Abstract

This article analyzes vulnerabilities in a 5G simulation environment to assess the security of IoT device communication through the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol. A laboratory scenario was designed with legitimate IoT messages and simulated attacks, using both unencrypted traffic and traffic protected with AES-CFB (Advanced Encryption Standard in Cipher Feedback mode). The analyzer classified messages, verified broker responses, and evaluated security measures. Results show that encryption partially protects but does not prevent attacks without strong authentication, highlighting the need for additional mechanisms such as mutual authentication and digital signatures to ensure comprehensive communication security.

It was also found that although encryption provides confidentiality, it does not prevent attacks in the absence of robust authentication. In the encrypted scenario, 66.20% of the traffic corresponded to attacks, compared to 48.80% in the unencrypted scenario, indicating that encryption does not reduce the proportion of malicious traffic and, in fact, increased the acceptance of attack messages by 17.4% compared to the non-encrypted case. Additionally, the sending rate decreased from 19.02 msg/s without encryption to 13.98 msg/s with encryption, highlighting the impact of the cryptographic process on performance. In conclusion, effective IoT protection in 5G environments requires combining encryption with mutual authentication, digital signatures, and advanced integrity mechanisms. The results provide a replicable foundation for educational and training environments focused on IoT cybersecurity.

Keywords: 5G, IoT, security, MQTT, encryption, vulnerabilities, attacks.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado del internet de las cosas (IoT) y su integración con redes de quinta generación (5G) ha permitido el desarrollo de aplicaciones críticas que dependen de la transmisión segura y confiable de datos en tiempo real. Tecnologías como 5G, caracterizadas por su baja latencia y alta capacidad de conexión, facilitan la comunicación masiva entre dispositivos, pero también amplían la superficie de ataque y la exposición a amenazas cibernéticas en ecosistemas IoT (Zreikat et al., 2025). En este escenario altamente conectado, los desafíos de seguridad desempeñan un papel central, en especial cuando los dispositivos intercambian información sensible o realizan tareas de misión crítica.

En este contexto, el problema emerge cuando el tráfico IoT circula en texto plano o con cifrados básicos, lo que facilita ataques de inyección, repetición o suplantación, sobre todo en arquitecturas complejas como las de 5G, donde la densidad de dispositivos dificulta la detección temprana de comportamientos maliciosos (Cárdenas-Quintero et al., 2020). Esta situación demanda evaluar no solo si el cifrado protege la confidencialidad de los datos, sino también su impacto en la seguridad integral del flujo de comunicación y en el rendimiento del sistema.

Desde esta perspectiva, la justificación del presente trabajo radica en que, aunque existen estudios conceptuales sobre seguridad 5G-IoT, son escasos los análisis experimentales que contrastan el comportamiento del protocolo MQTT con cifrado y sin él en escenarios controlados. Evaluar estas condiciones permite comprender en qué medida el cifrado aporta protección real y cuáles vulnerabilidades persisten cuando no se implementan mecanismos complementarios, como autenticación mutua, integridad de mensajes o firmas digitales (Sousa and Reis, 2024).

Este artículo se estructura de la siguiente manera: primero se presenta el marco teórico sobre 5G, IoT, MQTT, cifrado y amenazas; luego se describe la metodología empleada en el entorno de simulación; posteriormente, se analizan los resultados obtenidos, y por último, se discuten los hallazgos y se exponen las conclusiones del estudio.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto del cifrado en la seguridad del tráfico MQTT sobre redes 5G-IoT mediante un entorno de simulación controlado.

INTRODUCTION

The rapid growth of the Internet of Things (IoT) and its integration with fifth generation (5G) networks has enabled the development of critical applications that depend on secure and reliable real-time data transmission. Technologies such as 5G, characterized by low latency and high connection capacity, facilitate mass communication between devices, but also expand the attack surface and exposure to cyber threats in IoT ecosystems (Zreikat et al., 2025). In this highly connected scenario, security challenges play a central role, especially when devices exchange sensitive information or perform mission-critical tasks.

In this context, the problem arises when IoT traffic circulates in plain text or with basic encryption, facilitating injection, replay, or spoofing attacks, especially in complex architectures such as 5G, where device density makes early detection of malicious behavior difficult (Cárdenas-Quintero et al., 2020). This situation requires evaluating not only whether encryption protects data confidentiality, but also its impact on the overall security of the communication flow and system performance.

From this perspective, the rationale for this work lies in the fact that, although there are conceptual studies on 5G-IoT security, there are few experimental analyses that compare the behavior of the MQTT protocol with and without encryption in controlled scenarios. Evaluating these conditions allows us to understand the extent to which encryption provides real protection and what vulnerabilities persist when complementary mechanisms, such as mutual authentication, message integrity, or digital signatures, are not implemented (Sousa and Reis, 2024).

This article is structured as follows: first, the theoretical framework on 5G, IoT, MQTT, encryption, and threats is presented; then, the methodology used in the simulation environment is described; next, the results obtained are analyzed; and finally, the findings are discussed and the conclusions of the study are presented.

The objective of this work is to evaluate the impact of encryption on the security of MQTT traffic over 5G-IoT networks using a controlled simulation environment.

MARCO TEÓRICO

Tecnología 5G e internet de las cosas (IoT)

En los últimos años, el IoT ha revolucionado la comunicación al permitir que objetos cotidianos como sensores, electrodomésticos o vehículos se conecten a internet, posibilitando la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real para optimizar procesos en sectores como salud, industria, agricultura y ciudades inteligentes (Mouapi y Hakem, 2017). La expansión del IoT exige mayor conectividad, donde 5G surge como solución clave por su alta velocidad, baja latencia y capacidad masiva, permitiendo aplicaciones críticas como vehículos autónomos, monitoreo remoto de pacientes y automatización industrial avanzada (Siles y Salas, 2020). Sin embargo, la integración 5G-IoT plantea desafíos de seguridad, con riesgos como ataques DDoS o FDIA que afectan redes ciberfísicas. Para su detección, se emplean herramientas de análisis, entre las que se destaca Wireshark como analizador de protocolos de código abierto (Zreikat et al., 2025; Tech et al., 2024; Sikos, 2020). La creciente interconexión incrementa vulnerabilidades, por lo que se requieren cifrado avanzado y autenticación robusta para proteger la información (Sousa y Reis, 2024; Hameed et al., 2019).

Protocolo MQTT

El Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) es el protocolo estándar de comunicación en IoT debido a su ligereza. En este estudio se analiza su seguridad, considerando que su utilización en texto plano facilita la interceptación de información, acción que compromete la confidencialidad e integridad de los datos en tiempo real. MQTT opera con un modelo publicador-suscriptor, en el que los dispositivos envían mensajes a un servidor intermediario denominado *broker*, encargado de distribuirlos según los temas (*topics*) suscritos por los clientes (Hunkeler et al., 2008; Banks y Gupta, 2019).

Su eficiencia se debe a que se diseñó para redes con ancho de banda limitado, alta latencia y dispositivos con bajos recursos energéticos, motivo por el cual se emplea ampliamente en sistemas IoT industriales, agrícolas y de salud (Gupta y Shukla, 2021).

Cifrado y seguridad en la red

El cifrado permite asegurar la confidencialidad de los datos en tránsito en redes 5G-IoT.

- **Advanced Encryption Standard (AES).** Es un método simétrico valorado por su eficiencia, adoptado como estándar por el NIST debido a su seguridad y eficiencia. Su implementación en entornos 5G-IoT es clave para prevenir la interceptación y manipulación de la información (Cárdenas-Quintero et al., 2020).
- **Elliptic Curve Cryptography (ECC).** Es un algoritmo asimétrico basado en propiedades matemáticas de curvas elípticas, que además de generar claves públicas y privadas ofrece alta seguridad con claves más cortas que RSA (Rivest, Shamir y Adleman). Su eficiencia en procesamiento y bajo consumo energético lo convierten en una alternativa idónea para dispositivos IoT con recursos limitados, siendo esencial en entornos 5G-IoT (Cárdenas-Quintero et al., 2020).
- **Authentication and Key Agreement (5G-AK).** Se diseñó específicamente para redes 5G, con el fin de mejorar la seguridad frente a ataques como la suplantación e interceptación de datos. Este protocolo permite autenticación mutua y establecimiento de claves seguras en comunicaciones críticas (Cárdenas-Quintero et al., 2020). Según el 3rd Generation Partnership Project (3GPP, 2022), 5G-AKA emplea claves simétricas compartidas entre la SIM (*Subscriber Identity Module*) y el servidor AUSF (*Authentication Server Function*), reforzando la protección del sistema.

Detección de amenazas

En entornos IoT y 5G, la detección de amenazas se vuelve crucial para garantizar la confiabilidad del sistema. Herramientas como Wireshark permiten capturar y examinar paquetes de red para analizar cabeceras, protocolos y flujos de comunicación, detectando anomalías en tiempo real; este tipo de análisis se usa ampliamente en investigaciones académicas y en soluciones de seguridad aplicadas a redes IoT (Parra Camargo, 2023). Para la protección de estas redes se emplean herramientas de análisis de tráfico, como Wireshark, que permiten inspeccionar protocolos y detectar anomalías. Así mismo, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático cum-

plen un papel creciente en la identificación de patrones sospechosos y la mitigación de ataques DDoS. Estas tecnologías permiten analizar el comportamiento del tráfico en tiempo real, detectar desviaciones respecto a patrones normales y fortalecer los sistemas de seguridad en entornos IoT y 5G, donde la densidad de dispositivos incrementa la superficie de ataque (Banaamah y Ahmad, 2022; Dahou et al., 2022).

Vulnerabilidades en redes 5G aplicadas al IoT

De acuerdo con Cárdenas-Quintero et al. (2020), IoT presenta vulnerabilidades en autenticación, cifrado y control de acceso, que se amplifican en entornos 5G; además, la falta de protocolos robustos y la diversidad de dispositivos facilitan la interceptación de información, comprometiendo confidencialidad e integridad de datos en tiempo real.

El desarrollo de la tecnología 5G ha transformado la conectividad del IoT al permitir comunicaciones más rápidas, eficientes y escalables entre dispositivos; sin embargo, esta evolución introduce desafíos significativos en materia de ciberseguridad, especialmente relacionados con vulnerabilidades de red, ataques dirigidos y una superficie de ataque ampliada debido a arquitecturas descentralizadas basadas en NFV y SDN (Wala y Kiran, 2024).

Moudoud et al. (2022) identifican amenazas como la falsificación de datos en inyección (FDIA) y los ataques DDoS, mientras que Melzer et al. (2024) evidencian su impacto directo en entornos 5G-IoT, destacando riesgos en señalización, control y comunicación masiva entre dispositivos.

Ataques de denegación de servicio distribuidos (DDoS)

Los entornos 5G-IoT son especialmente vulnerables a ataques DDoS debido a la limitada capacidad de procesamiento y seguridad de muchos dispositivos IoT, que carecen de autenticación sólida y protocolos robustos, lo cual facilita que los atacantes los comprometan y generen tráfico malicioso.

Cárdenas-Quintero et al. (2020) señalan que los DDoS afectan la disponibilidad y se pueden usar como distracción para exfiltración de datos o manipulación de configuraciones. La arquitectura descentralizada y los numerosos nodos dificultan la detección temprana.

En este contexto, se proponen soluciones basadas en inteligencia artificial y *machine learning* para mitigar el impacto de los ataques.

Prevención de ataques en el entorno 5G-IoT

La prevención de ataques en 5G-IoT exige tecnologías emergentes y medidas sólidas. La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático son claves en la detección de amenazas, puesto que con la IA, por ejemplo, se pueden analizar datos masivos en tiempo real, identificando patrones sospechosos y respondiendo proactivamente (Reis, 2025). El aprendizaje automático ayuda a entrenar modelos para reconocer anomalías en el tráfico y activar defensas. Según Cárdenas-Quintero et al. (2020), su integración en 5G-IoT es esencial contra ataques DDoS e interceptación de datos.

Desafíos y futuras tendencias de 5G-IoT

La expansión de dispositivos IoT en redes 5G incrementa riesgos como interceptación de datos y DDoS (Cárdenas-Quintero et al., 2020). Tecnologías como *blockchain* y cifrado avanzado resultan esenciales. Aun cuando 5G ofrece baja latencia, su gestión sigue siendo un reto; Network Slicing permite emplear subredes para aplicaciones críticas (Campolo et al., 2018).

ESTADO DEL ARTE

Cifrado y autenticación

Como respuesta a estas vulnerabilidades, el cifrado y la autenticación se convierten en pilares fundamentales para la protección de datos y la validación segura de dispositivos. Abie y Pirbhulal (2024) proponen un marco de seguridad adaptativo basado en inteligencia artificial para la detección en tiempo real de amenazas, mientras que Basurto y Guña (2023) resaltan la autenticación multifactor (MFA) como uno de los mecanismos más efectivos para fortalecer la seguridad en dispositivos IoT con recursos limitados. Estas estrategias buscan mitigar accesos no autorizados y reducir la exposición ante ataques avanzados.

Estrategias de prevención basadas en IA y blockchain

Además de los mecanismos tradicionales, en la bibliografía reciente se destacan enfoques emergentes como *blockchain*, segmentación de red y aprendizaje automático. Ciotirnae (2024) subraya la capacidad de *blockchain* para asegurar integridad, trazabilidad y resistencia a manipulación en redes distribuidas, en tanto que Melzer et al. (2024) sugieren la inclusión de entrenamientos tipo “Capture the Flag” (CTF) como una práctica efectiva para preparar sistemas y equipos frente a ataques sofisticados. Estas estrategias complementan los modelos de cifrado y autenticación al ofrecer capas adicionales de protección que se adaptan a la naturaleza distribuida e intensiva del ecosistema 5G-IoT.

En la mayoría de los estudios se analiza la seguridad de 5G-IoT en materia conceptual, pero pocos evalúan experimentalmente el efecto del cifrado sobre protocolos ligeros, como MQTT. Este vacío motiva la propuesta metodológica del presente artículo

METODOLOGÍA

En este artículo se presenta un análisis de seguridad en redes 5G-IoT, centrándose en la parametrización del tráfico de redes 5G en un entorno de simulación controlado. Se desarrolló una metodología estructurada en cuatro fases para garantizar un análisis de las amenazas presentes en estas redes y evaluar estrategias de mitigación.

Revisión bibliográfica

Se hizo una revisión bibliográfica centrada en la seguridad de redes 5G aplicadas a IoT. Se consultaron artículos científicos, informes técnicos y documentos académicos disponibles en bases de datos como IEEE

Xplore, ScienceDirect y Google Scholar. Esta revisión permitió identificar trabajos relevantes sobre las principales amenazas que enfrentan las redes 5G-IoT, así como enfoques recientes para su mitigación mediante técnicas como la inteligencia artificial, el análisis de tráfico y la segmentación de redes.

Parámetros técnicos de entorno 5G

El análisis se basó en un entorno de comunicación 5G simulado, configurado bajo parámetros técnicos fundamentales para esta tecnología, entre estos la latencia ultrabaja (1-10 ms), el ancho de banda promedio entre 100 y 900 Mbps y la capacidad para soportar hasta un millón de dispositivos por km² (3GPP, 2022; Zreikat et al., 2025). Estas características permitieron reproducir condiciones reales de operación para dispositivos IoT, donde la velocidad, la eficiencia espectral y la confiabilidad del canal son determinantes para el desempeño del protocolo MQTT (Cárdenas-Quintero et al., 2020; Hameed et al., 2019).

En este entorno, la comunicación se ejecutó mediante MQTT sobre TCP/IP, evaluando tráfico sin cifrar y tráfico protegido mediante **AES-CFB de 128 bits**, con pruebas complementarias bajo **TLS 1.2** para simular canales seguros en redes 5G (Sikos, 2020). La captura del tráfico, con una duración aproximada de 849 segundos por escenario, permitió identificar tasas de envío entre 13,98 y 19,02 mensajes por segundo, reflejando el impacto de la carga de cifrado en el rendimiento (Moudoud et al., 2021; Reis, 2025a).

A continuación, se presenta el flujo metodológico de la simulación, que comienza con la configuración del entorno Python y finaliza con la captura de tráfico en formato. Pcapng (figura 1).

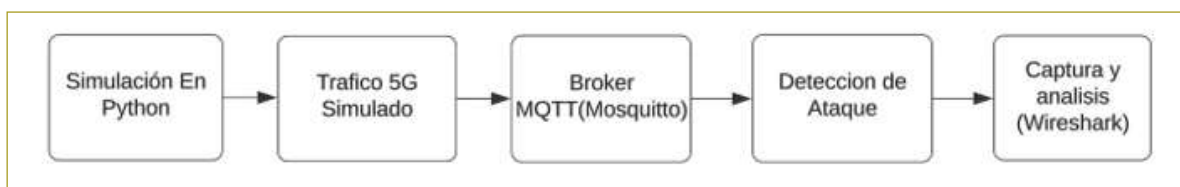


Figura 1. Diagrama de flujo de la ejecución de la simulación hecha en Python

Fuente: Elaboración propia (2025).

Diseño del entorno de simulación 5G-IoT

- Configuración de un escenario de laboratorio que emuló la comunicación de un dispositivo IoT hacia un *broker* MQTT, representando el canal de transmisión sobre una red 5G.
- Definición de tópicos MQTT para mensajes legítimos y generación de tráfico de ataque (por ejemplo, inyección de datos y repetición de mensajes).
- Establecimiento de dos escenarios de comunicación: tráfico sin cifrado (MQTT en claro) y tráfico con cifrado de *payload* (AES-CFB, con clave fija de laboratorio).

Captura y procesamiento del tráfico

- Recolección de paquetes en formato. pcapng usando Wireshark.
- Aplicación de filtros de visualización (*display filters*) para identificar tráfico MQTT.
- Registro de metadatos relevantes: tópico, dirección IP, tamaño de *payload* y presencia de cifrado.

Desarrollo del analizador de tráfico

- Implementación en Python (Anaconda) utilizando librerías como pyshark, paho-mqtt, pandas y matplotlib.
- Clasificación de mensajes en dos categorías: legítimos (IoT) y de ataque (simulados).
- Verificación de éxito en la comunicación mediante la confirmación del *broker* (Puback), lo cual permitió discriminar entre mensajes aceptados y rechazados.
- Incorporación de funciones para validar un descifrado correcto de mensajes en el escenario cifrado.

Análisis de resultados y evaluación de vulnerabilidades

- Generación de estadísticas descriptivas mediante la distribución de mensajes por tópico, proporción de tráfico cifrado/no cifrado, tasa de éxito en la entrega de mensajes y ocurrencia de ataques detectados.
- Representación gráfica de los resultados por medio de diagramas de barras y series temporales.
- Discusión de hallazgos en relación con vulnerabilidades identificadas en entornos 5G-IoT y estrategias de seguridad recomendadas en la bibliografía existente.

Definición del entorno de simulación

La simulación de tráfico 5G-IoT se orientó al análisis de seguridad mediante un entorno local para generar, transmitir y analizar datos en tiempo real. El objetivo fue recrear condiciones de red, identificar ataques, clasificar eventos y evaluar mitigaciones. Se diseñaron dos escenarios: con cifrado y sin él, contrastando vulnerabilidades y medidas de protección. El código simuló una plataforma IoT con *broker* y clientes MQTT, publicando mensajes JSON bajo MQTT v5.2. Se aplicó cifrado/descifrado, detectando excepciones y ataques. Finalmente, los intercambios quedaron registrados en *Análisis N encrip.pcapng* para evaluación posterior.

Captura y análisis del tráfico IoT con cifrado TLS y sin él

Se configuró un cliente para generar tráfico cifrado hacia un servidor TLS, capturando con Wireshark desde el *handshake* TCP hasta TLS, negociando certificados y *cipher suite*. Los datos aparecieron como Application Data, confirmando cifrado. Se usaron certificados digitales, librerías (*requests*, Paho-MQTT) y Wireshark para verificar versión TLS y parámetros. El entorno se desarrolló en macOS por estabilidad y soporte Python, gestionado con Anaconda y Jupyter (Anaconda Software Distribution, 2023). La simulación incluyó Paho-MQTT, Pyshark, Matplotlib, CSV, nest_asyncio, un *broker* Mosquitto y una red 5G simulada para análisis forense.

Entorno simulado: descripción de elementos

A renglón seguido se muestra el diagrama de bloques del análisis de tráfico en el entorno 5G-IoT. El dispositivo IoT legítimo envía mensajes cifrados con AES-CFB al *broker* MQTT, mientras un atacante simulado genera mensajes maliciosos. El analizador, desarrollado en Python con Pyshark, captura paquetes PCAPNG y verifica respuesta del *broker*: mensajes exitosos se clasifican como legítimos, y los fallidos como ataques, reforzando la detección de vulnerabilidades en IoT sobre 5G (figura 2).

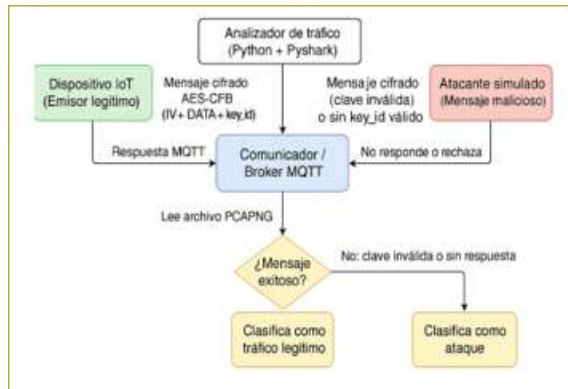


Figura 2. Diagrama en detalle de la simulación con información sobre la comunicación entre los componentes

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la figura siguiente se puede apreciar el esquema de captura y análisis de tráfico MQTT con Wireshark. Se aplicó un filtro (mqtt) para aislar paquetes entre dispositivo IoT, *broker* y atacante en 5G. La captura en modo promiscuo registró mensajes legítimos y ataques, base para evaluar vulnerabilidades (figura 3).

Simulación de tráfico

Dispositivo IoT - Nodo IoT emisor. El dispositivo IoT actúa como emisor legítimo en 5G, enviando mensajes cifrados mediante MQTT hacia el *broker*, que gestiona respuestas.

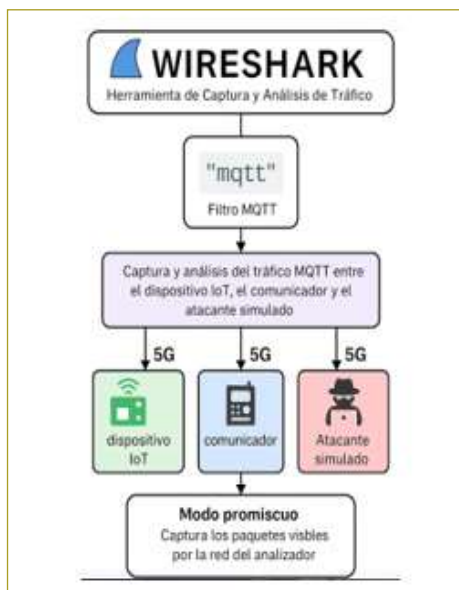
Tabla 1
Elementos y características del entorno simulado para el análisis de tráfico IoT

Elemento	Descripción	Funciones	Protocolo / Características técnicas	Ejemplo / Importancia
1. Dispositivo IoT	Nodo emisor legítimo que genera mensajes MQTT cifrados con AES en modo CFB.	Publica datos hacia el <i>broker</i> MQTT. Usa cifrado simulado para proteger la integridad y confidencialidad del mensaje.	MQTT sobre TCP/IP en una red 5G.	Sensor ambiental o dispositivo <i>wearable</i> inteligente.
2. Comunicador / Broker MQTT (Mosquitto)	Actúa como intermediario de mensajes entre los dispositivos. Verifica la recepción y reenvía los mensajes.	Recibe mensajes del dispositivo IoT. Responde (ACK) para confirmar recepción. Identifica intentos de ataque por tráfico inusual o malformado.	<i>Broker</i> Mosquitto en red local simulada 5G. Compatible con tráfico cifrado (sin descifrarlo directamente).	Asegura la comunicación y controla la integridad del tráfico.
3. Atacante simulado	Nodo que inyecta mensajes MQTT maliciosos o manipulados, cifrados o sin cifrado.	Inyecta mensajes ilegítimos. – Simula comportamiento legítimo para evadir detección. Prueba la capacidad de detección y clasificación de tráfico malicioso.	También usa MQTT, pero puede fallar al recibir respuesta del <i>broker</i> .	Evaluación de la resiliencia del sistema frente a ciberataques.
4. Red 5G simulada	Capa de comunicación que interconecta todos los elementos.	Transmisión de paquetes de baja latencia. Simula la infraestructura de una red móvil de próxima generación (5G Standalone o Non-Standalone).	Emula el entorno de comunicación 5G.	Evalúa el rendimiento en escenarios con IoT masivo.
5. Analizador de tráfico	Sistema implementado en Python que lee archivos .pcapng, descifra el tráfico (si aplica), clasifica los mensajes (legítimos o ataque) y evalúa si hubo respuesta del comunicador.	Interpretación del tráfico MQTT. Validación de éxito de mensajes mediante la respuesta del <i>broker</i> . Exportación de resultados para análisis comparativo.	Implementado en Python con librerías como pyshark , compatible con tráfico cifrado y descifrado (si aplica).	Análisis detallado del comportamiento de la red y eficacia del sistema de detección.

Fuente: Elaboración propia con base en la definición del entorno de simulación compuesto por dispositivo IoT, comunicador/*broker* MQTT, atacante simulado, red 5G simulada y analizador de tráfico.

Figura 3. Diagrama de comunicación y captación del tráfico en el entorno 5G

Fuente: Elaboración propia (2025).



Comunicador central (broker MQTT)

El comunicador, como *broker* MQTT, recibe, procesa y reenvía mensajes, validando autenticidad y éxito, y generando respuestas cuando son válidos.

Nodo atacante (simulación de amenazas IoT en entorno 5G)

Función en el entorno simulado. El atacante simulado representa un dispositivo malicioso que busca comprometer la comunicación en el entorno 5G, enviando mensajes falsos al *broker* MQTT para simular ataques como inyección, suplantación o denegación de servicio.

Mecanismo de cifrado utilizado en el payload (base 64 simulado). El cifrado del *payload* usa una simulación en base 64, lo que permite observar la gestión de transmisiones cifradas en IoT. Aunque no es un cifrado fuerte, facilita comprender la protección de datos en sistemas reales.

Analizador Python para tráfico MQTT cifrado (AES-CFB)

Objetivo. Detectar, clasificar y validar el éxito de mensajes transmitidos en un entorno simulado con dispositivos IoT y ataques maliciosos sobre una red simulada de tipo 5G, utilizando el protocolo MQTT cifrado.

Captura y análisis de tráfico de la simulación

Wireshark en el entorno de simulación de tráfico IoT sobre 5G

Wireshark es una herramienta de análisis de protocolos de red utilizada para capturar, inspeccionar y diagnosticar el tráfico que circula en una red. En este entorno experimental, Wireshark cumple un papel fundamental para:

- Capturar en tiempo real el tráfico generado por los tres actores del sistema: el dispositivo IoT, el comunicador central y el atacante simulado.
- Filtrar exclusivamente el protocolo MQTT, que es el canal principal de comunicación entre los dispositivos.
- Exportar el tráfico capturado en archivos. pcapng para su posterior análisis con herramientas automatizadas en Python.

Durante la simulación, se aplicó el siguiente filtro de visualización en Wireshark:

- Visualizar únicamente los paquetes asociados al protocolo MQTT.
- Excluir todo el tráfico irrelevante (como DNS, ARP, HTTP, etc.).
- Facilitar la identificación de patrones de comunicación entre los dispositivos, incluyendo:
 - Mensajes de publicación (Publish).
 - Mensajes de conexión (Connect).
 - Mensajes de suscripción (Subscribe).
 - Respuestas del *broker* o comunicador (Connack, Puback, Suback, etc.).

RESULTADOS

Después de la captura se elaboró un consolidado en Excel, en el que se organizaron y compararon los resultados del tráfico IoT con dos condiciones: se clasificaron los datos sin cifrado y con cifrado en función de las etiquetas de los mensajes y se representó la proporción relativa de los registros, mostrando por ejemplo el tráfico con cifrado, los intentos de ataque (ataque/dispositivo 1) y la identificación de mensajes válidos (SI).

El entorno de simulación permitió evaluar el comportamiento del protocolo MQTT en una red 5G en dos condiciones: tráfico sin cifrado y tráfico protegido mediante cifrado AES-CFB. La base de datos consoli-

dada registró los mensajes enviados por el dispositivo IoT, así como los ataques simulados inyectados en los mismos tópicos.

Los resultados muestran lo siguiente (tablas 2 y 3).

En general, los resultados demuestran que el cifrado fortalece la protección de los datos transmitidos, pero no constituye un mecanismo suficiente para evitar ataques de suplantación o repetición. Se hace evidente la necesidad de incorporar mecanismos adicionales, como autenticación mutua y validación de integridad de los mensajes, para garantizar la seguridad integral en entornos IoT sobre 5G.

A renglón seguido (figura 4), se presenta la proporción de mensajes clasificados como legítimos (**NO**) y como ataques (**SI**) en los escenarios de tráfico MQTT con cifrado y sin cifrado dentro del entorno de simulación 5G-IoT. En el caso del tráfico cifrado, los mensajes de ataque alcanzaron un 28,05 %, en tanto que los

mensajes legítimos representaron un 14,32 %. Por otra parte, en el tráfico sin cifrado los mensajes de ataque representaron un 28,13 % y los legítimos alcanzaron un 29,51 %, resultados que indican que si bien el cifrado contribuye a la protección de la información transmitida, no elimina la posibilidad de que se generen mensajes maliciosos, lo que evidencia la necesidad de mecanismos adicionales de autenticación y verificación de integridad para reforzar la seguridad en redes 5G-IoT.

A continuación, se presenta la distribución de mensajes clasificados como ataques y legítimos en el escenario de tráfico MQTT con cifrado dentro del entorno de simulación 5G-IoT. Los resultados muestran que el 66,20 % de los mensajes correspondieron a intentos de ataque (ataque/dispositivo 1), mientras que el 33,80 % se identificaron como mensajes legítimos enviados por el dispositivo IoT (iot/dispositivo 1). Esta alta proporción de tráfico malicioso evidencia que, aun

Tabla 2
Datos estadísticos descriptivos del tráfico con cifrado y sin él

Tipo de tráfico	Número de mensajes	Inicio	Fin	Duración (segundos)	Tasa de envío (msg/seg)
Tráfico con Cifrado	11868	2025-07-20 19:02:51.005	2025-07-20 19:16:59.954	848.949	13,98
Tráfico sin Cifrado	16146	2025-07-20 10:22:43.000	2025-07-20 10:36:52.000	849.000	19,02

Fuente: Elaboración propia, con base en los datos obtenidos del análisis del archivo pcapng generado por Wireshark y analizado en Python por analizador utilizado en la simulación.

Tabla 3
Resultados del análisis de tráfico IoT en escenarios cifrados y no cifrados

Resultado	
Distribución de mensajes por tópico	- Mensajes legítimos en tráfico cifrado: 33,80 % - Mensajes de ataque en tráfico cifrado: 66,20 % - Mensajes legítimos en tráfico sin cifrado: 51,20 % - Mensajes de ataque en tráfico sin cifrado: 48,80 %
Tráfico cifrado vs. no cifrado	- Tráfico sin cifrado: $\approx$ 50 % - Tráfico con cifrado AES-CFB: $\approx$ 50 %
Éxito en la comunicación	- Mensajes legítimos con Puback (éxito): Alto porcentaje en ambos escenarios (coherente con 33,80 % vs. 51,20 % legítimos). - Mensajes de ataque con Puback (éxito bajo): En cifrado, muchos ataques fueron aceptados (66,20 %), más que en no cifrado (48,80 %).
Detección de ataques	- Ataques detectados (clasificación del analizador): - Cifrado: 66,20 % - No cifrado: 48,80 % - Tipos detectados: inyección y replay
Visualización de resultados	- En tráfico cifrado (figura 4): 28,05 % ataques, 14,32 % legítimos - En tráfico no cifrado (figura 4): 28,13 % ataques, 29,51 % legítimos

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del experimento de análisis de tráfico IoT.

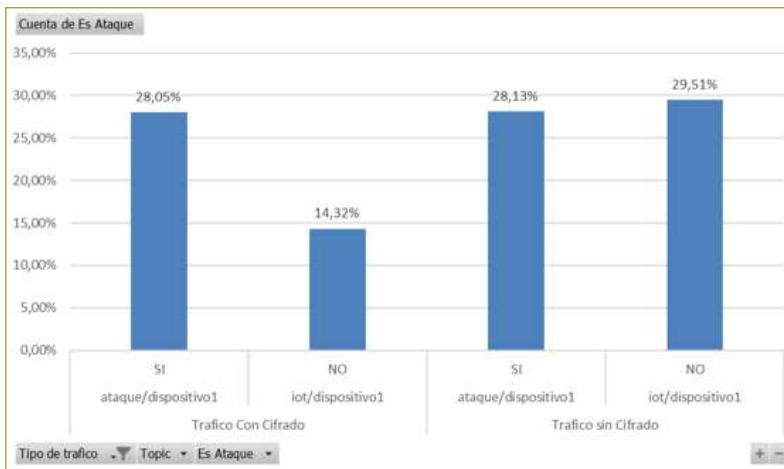


Figura 4. Distribución porcentual de mensajes legítimos y de ataque en escenarios con cifrado y sin él
Fuente: Elaboración propia (2025).

cuando el cifrado protege la confidencialidad de los datos transmitidos, no impide que un atacante intente inyectar mensajes en la red, lo que resalta la necesidad de complementar el cifrado con mecanismos robustos de autenticación y control de acceso.

En la figura que aparece a continuación (figura 6) se puede ver la distribución de mensajes clasificados como ataques y legítimos en el escenario de tráfico MQTT sin cifrado dentro del entorno de simulación 5G-IoT. Los resultados evidencian que el 48,80 % de los mensajes correspondieron a intentos de ataque (ataque/dispositivo 1), mientras que el 51,20 % de estos se identificaron como mensajes legítimos enviados por el dispositivo IoT (iot/dispositivo 1).

A diferencia del escenario con cifrado, en este caso la proporción de mensajes legítimos supera levemente a los mensajes de ataque, lo que sugiere que, aun cuando el tráfico no está protegido, los mensajes legítimos mantienen una mayor participación. Sin embargo, la exposición en texto plano aumenta la vulnerabilidad del sistema frente a la interceptación y manipulación de la información transmitida.

DISCUSIÓN

La comparación entre los dos escenarios evaluados (tráfico MQTT con cifrado y sin él) demuestra que el cifrado aporta un nivel básico de protección al ocultar el



Figura 5. Proporción de mensajes legítimos y de ataque en el escenario con tráfico cifrado
Fuente: Elaboración propia (2025).

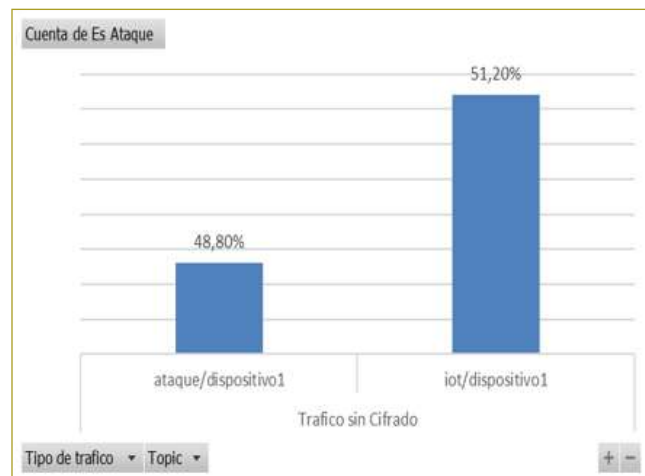


Figura 6. Proporción de mensajes legítimos y de ataque en el escenario con tráfico sin cifrado
Fuente: Elaboración propia (2025).

contenido del mensaje, pero no garantiza por sí mismo la seguridad integral en entornos 5G-IoT. Aunque el uso de AES-CFB impide la lectura directa del *payload*, los resultados evidenciaron que los ataques de repetición (*replay*) e inyección de mensajes se mantuvieron funcionales, incluso bajo tráfico cifrado, debido a la ausencia de mecanismos de autenticación y verificación de integridad. Este comportamiento coincide con lo reportado por Cárdenas-Quintero et al. (2020), quienes destacan que las vulnerabilidades en autenticación continúan siendo el principal vector de riesgo en IoT, incluso cuando se emplea cifrado.

Un hallazgo relevante es que el escenario cifrado presentó una mayor proporción de mensajes maliciosos exitosos. Esto se explica por dos factores:

- La estructura del protocolo MQTT no cambia por aplicar cifrado al *payload*, por lo que un atacante puede generar mensajes con encabezados válidos y tópicos correctos, sin necesidad de acceder al contenido.
- El uso de una clave AES fija y sin rotación en el entorno simulado facilita que un atacante que conozca el patrón del tráfico pueda replicar mensajes aparentemente legítimos, lo que incrementa la tasa de aceptación por parte del *broker*.

Estos resultados están alineados con lo planteado por Moudoud et al. (2022), quienes demuestran que ataques FDIA y de suplantación se pueden mantener efectivos incluso en entornos cifrados, cuando no existe verificación de origen ni mecanismos de integridad.

Por otra parte, la verificación mediante Puback se consolidó como un indicador clave para diferenciar tráfico legítimo de ilegítimo; sin embargo, tal validación se limita a confirmar la entrega del mensaje y no evalúa su autenticidad, lo que explica por qué algunos mensajes maliciosos también recibieron respuesta positiva del *broker*. Esto corrobora lo planteado por Reis (2025b) sobre la necesidad de complementar el cifrado con autenticación mutua y monitoreo avanzado para una detección más precisa.

Finalmente, es importante reconocer las limitaciones del entorno simulado. El uso de una clave estática, la ausencia de TLS real, la no implementación de 5G-AKA y la capacidad reducida de un entorno local simplifican la dinámica de ataque. En un entorno real, factores como

rotación de claves, certificados digitales, variabilidad de latencia y segmentación de red (*network slicing*) podrían modificar el comportamiento observado. No obstante, el experimento ofrece un marco reproducible que permite aislar variables críticas del protocolo MQTT y evaluar su comportamiento frente a ataques comunes en redes IoT.

En conjunto, los resultados refuerzan que la seguridad en 5G-IoT se debe abordar mediante un enfoque multicapa, en el que el cifrado del *payload* constituye apenas uno de los componentes necesarios. La combinación de autenticación fuerte, integridad del mensaje, control de acceso y detección temprana de anomalías es fundamental para mitigar ataques de suplantación, inyección y repetición en entornos complejos y distribuidos.

Los resultados confirman que la seguridad del IoT no depende del cifrado individual, sino de arquitecturas multicapa que integren autenticación y monitoreo inteligente.

CONCLUSIONES

En el estudio se demostró que la integración de dispositivos IoT sobre redes 5G presenta vulnerabilidades significativas cuando se emplean protocolos ligeros como MQTT, sin mecanismos adicionales de autenticación e integridad. Aun cuando el cifrado AES-CFB aplicado al *payload* aporta confidencialidad básica, los resultados confirman que este control no es suficiente para mitigar ataques de inyección, repetición o suplantación, en particular cuando un atacante puede replicar encabezados y tópicos válidos sin necesidad de acceder al contenido del mensaje.

La verificación mediante Puback se consolidó como un elemento clave para determinar la entrega exitosa de los mensajes y diferenciar parcialmente tráfico legítimo de tráfico malicioso. No obstante, esta validación no garantiza autenticidad ni integridad, lo que permitió que el *broker* aceptara ciertos ataques, incluso en el escenario cifrado. Esto resalta la necesidad de adoptar mecanismos más robustos en lo referente a la capa de aplicación o transporte, como autenticación mutua con certificados, firmas digitales o empleo de TLS (mqtts://).

El análisis comparativo entre tráfico cifrado y no cifrado evidenció que la tasa de éxito de los mensajes legítimos fue mayor cuando se verificó la respuesta del

broker, mientras que los mensajes maliciosos mantuvieron niveles significativos de aceptación en ambos escenarios. Estos resultados confirman que la seguridad en entornos 5G-IoT no puede depender únicamente del cifrado del *payload* y debe migrar hacia esquemas multi-capas que incluyan controles criptográficos, validación estricta del origen del mensaje y políticas avanzadas de control de acceso.

Desde el punto de vista metodológico, el uso conjunto de Wireshark y un analizador Python permitió identificar patrones de tráfico, detectar anomalías y registrar evidencia cuantitativa del comportamiento del protocolo MQTT en un entorno 5G simulado. Esta aproximación constituye un marco reproducible para auditorías, pruebas de laboratorio y análisis forense de tráfico IoT.

Finalmente, se identifican como líneas futuras de trabajo la integración de autenticación fuerte basada en certificados, la implementación de TLS nativo para MQTT, el empleo de rotación de claves y mecanismos de integridad como HMAC, así como la incorporación de modelos de detección de anomalías basados en inteligencia artificial para mejorar la clasificación de tráfico y anticipar comportamientos maliciosos.

En el futuro, se propone extender la simulación a escenarios de *edge computing* y comunicación TLS completa para evaluar la escalabilidad del entorno.

REFERENCIAS

- 3GPP (2022). *3rd Generation Partnership Project*. <https://portal.3gpp.org/#/>
- Abie, H., y Pirbhulal, S. (2024). *Autonomous Adaptive Security Framework for 5G-Enabled IoT*. <https://arxiv.org/abs/2406.03186v1>
- Atzori, L., Iera, A., y Morabito, G. (2010). The Internet of Things A Survey. *Computer Networks*, 54, 2787-2805. - References - Scientific Research Publishing.
- Basurto, M. O., y Gúaña, J. (2023, September). *Ciberseguridad en las redes 5G: desafíos y soluciones*. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/572/5724522008/html/>
- Campolo, C., Fontes, R. D. R., Molinaro, A., Rothenberg, C. E., y Iera, A. (2018). Slicing on the Road: Enabling the Automotive Vertical through 5G Network Softwarization. *Sensors*, 18(12), 4435. <https://doi.org/10.3390/S18124435>
- Cárdenas-Quintero, D., Ropero-Silva, E., Puerto-López, K., Sánchez-Mojica, K., Castro-Casadiegos, S., y Ramírez-Mateus, J. (2020). Vulnerabilidad en la seguridad del internet de las cosas. *Mundo FESC*, 10(19), 161-178. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.542>
- Ciotirnae, P. (2024). 5G Mobile Network with Blockchain, IoT and Drones Integration for Military Applications. *2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security, TechDefense 2024 - Proceedings*, 104-109. <https://doi.org/10.1109/TECHDEFENSE63521.2024.10863401>
- Hameed, S., Khan, F. I., y Hameed, B. (2019). Understanding Security Requirements and Challenges in Internet of Things (IoT): A Review. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2019(1), 9629381. <https://doi.org/10.1155/2019/9629381>
- Melzer, J., Shafo, A., Zhao, Z., Wang, P. P., Fenwick, W., y Almutadi, W. (2024). Developing "Capture the Flag" for 5G IoT Cyber Security Training. *2024 IEEE 10th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 816-821. <https://doi.org/10.1109/WF-IOT62078.2024.10811259>
- Mouapi, A., y Hakem, N. (2017, June). Enslavement of Wireless Sensor Network to an RF Energy Harvesting System. *Open Journal of Antennas and Propagation*, 5(2), <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2064753>
- Moudoud, H., Khoukhi, L., y Cherkaoui, S. (2022). Prediction and Detection of FDIA and DDoS Attacks in 5G Enabled IoT. *IEEE Network*, 35(2), 194-201. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000449>
- Reis, M. J. C. S. (2025). AI-Driven Anomaly Detection for Securing IoT Devices in 5G-Enabled Smart Cities. *Electronics* 2025, Vol. 14, Page 2492, 14(12), 2492. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14122492>
- Sikos, L. F. (2020). Packet analysis for network forensics: A comprehensive survey. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 32, 200892. <https://doi.org/10.1016/J.FSIDI.2019.200892>
- Siles R, y Salas M. (2020). *DISPOSITIVOS Y COMUNICACIONES MÓVILES*.
- Sousa, A., y Reis, M. J. C. S. (2024). 5G Security Features, Vulnerabilities, Threats, and Data Protection in IoT and Mobile Devices: A Systematic Review. In *ESIC2024* (Vol. 8).
- Tech, M., Alawe, R., y Soni, S. (2024). A Literature Survey of Distributed Denial of Service Attack Detection using Machine Learning: A Review. In *International Journal of Scientific Research y Engineering Trends* (Vol. 10, Issue 1).
- Wala, F. B., y Kiran, M. (2024). *5G Network Security Practices: An Overview and Survey*. <https://arxiv.org/abs/2401.14350v1>
- Zreikat, A. I., AlArnaout, Z., Abadleh, A., Elbasi, E., y Mostafa, N. (2025). The Integration of the Internet of Things (IoT) Applications into 5G Networks: A Review and Analysis. *Computers* 2025, Vol. 14, Page 250, 14(7), 250. <https://doi.org/10.3390/COMPUTERS14070250>

Model for energy management of a hybrid generation system connected to the grid

Modelo para la gestión energética de un sistema de generación híbrido conectado a la red

NICOLÁS ALEJANDRO ROJAS MELO¹ - DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO²

1. Estudiante de Maestría de Ingeniería Eléctrica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Magíster en Ingeniería Electrónica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0905-5019>.

nicolas.rojas-m@mail.escuelaing.edu.co, daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co

Recibido: 27/07/2025 Aceptado: 30/09/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Abstract

Given the need to provide electrical power services in places such as isolated communities where it is not feasible to build an electrical substation, a solution was developed through the design and implementation of two load profiles: residential and industrial. These were organized as resistive loads within a hybrid system composed of two solar modules, a vertical-axis wind turbine, two lead-acid batteries, and the electrical grid. Secondly, a methodology was applied based primarily on the implementation, development, and integration of a stationary autoregressive model derived from the prior characterization of the equipment, in order to represent the behavior of each renewable energy source—in this case, solar panels and a vertical-axis wind turbine. Finally, with the help of the software tools HOMER Energy and RETScreen, a financial and economic analysis of the hybrid system's performance was conducted, identifying the variables that determine return on investment, as well as the project's revenues and costs according to its geographic location.

Keywords: renewable resources, model predictive control, load profile, load flow, Internal Rate of Return (IRR), Cost of energy (COE), Net Present Cost (NPC), Cost of Inversion (CI), Return of Investment (ROI).

Resumen

Ante la necesidad de brindar el servicio de energía eléctrica en lugares como comunidades aisladas donde no se puede construir una subestación eléctrica, para lograr el objetivo se utilizó la deducción e implementación de dos perfiles de carga: residencial e industrial, los cuales se organizarían como carga resistiva para un sistema híbrido formado por dos módulos solares, un aerogenerador de eje vertical, dos baterías de plomo-ácido y la red eléctrica. En segundo lugar, se llevó a cabo una metodología basada principalmente en la aplicación, desarrollo y articulación de un modelo autorregresivo estacionario basado en la caracterización del equipo previamente establecido para representar el comportamiento de cada fuente de energía renovable, que en este caso se utilizaron paneles solares y un aerogenerador de eje vertical. Finalmente, con la ayuda de los softwares HOMER energy y RETScreen, se realizó el análisis financiero y económico del comportamiento del sistema híbrido, mostrando las variables que determinan el retorno de la inversión, los ingresos y los gastos del proyecto de acuerdo con su ubicación geográfica.

Palabras claves: recursos renovables, control predictivo de modelos, perfil de carga, flujo de carga, tasa interna de retorno (TIR), costo de la energía (COE), costo presente neto (CPN), costo de inversión (CI), retorno de la inversión (ROI).

INTRODUCTION

Nowadays there are multiple technological advances such as those inventions that generate energy through renewable resources and in turn are capable of bringing electric power service to some non-interconnected zones of the country. Its purpose is to convert the solar energy provided by the sun and the kinetic energy of the wind into an electrical resource. These technologies are known as photovoltaic solar panels and wind towers, which when used in the same set, this is called a hybrid generation system (HS).

One definition of a hybrid system is: an electricity distribution system containing distributed energy resources and loads (such as distributed generators, storage devices, or controllable loads) that can be operated in a controlled and coordinated manner, either while connected to the main power grid or while isolated (Marnay, 2016). Hybrid systems are designed to feed electrical, and heat loads for small communities, such as urbanization, universities, commercial areas, facilities and industrial parks, among others. These are essentially active distribution networks, because distributed generation systems and different loads in distribution voltage levels are conglomerated.

The reason why we are thinking of implementing these systems, and it is also a consequence of a need, is to be able to supply non-interconnected zones with the electric power service. With this solution, which some countries such as Brazil, Chile and Mexico (Osorio, 2012) are already taking advantage of, those municipalities, townships, localities and hamlets that are not connected to the National Interconnected System will benefit from electricity. Where the idea is to take advantage of the generation of non-Conventional Renewable Energy Sources (NCRES) to be consumed by the loads, and also, anticipating a failure of the HS in one or more of its circuits, the network will supply the missing energy if you have access to it, otherwise, a battery bank will function as a backup.

The inclusion of the NCRES brings with it a challenge in terms of the operation and management of the energy resource of the HS itself. This challenge requires managing a model that indicates the estimated generation of each source given a specific demand in the place where the system is implemented so that it works reliably, continuously and avoiding supply problems.

RESOURCE AVAILABILITY



Figure 1. Place of installation.

The project is located north of the city of Bogotá (Figure 1), on the roof of the laboratories of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito university. Through IDEAM's interactive atlas (IDEAM, 2005), it was possible to establish the availability of resources, both solar and wind, since the hybrid system is made up of two solar panels and a vertical axis wind turbine. A great advantage of this interactive tool is that historical information of three main variables that were used to develop this study can be found easily and quickly: temperature, irradiance and wind speed in the location where the project is located.

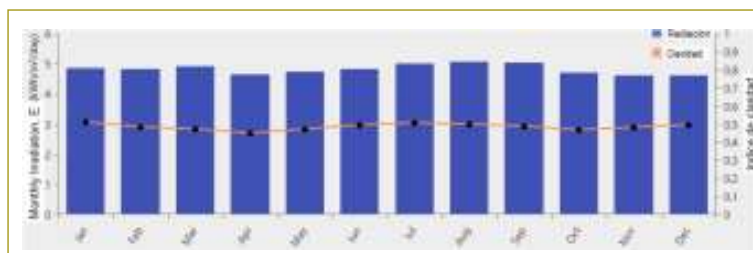


Figure 2. Monthly average irradiation.

To proceed with the monthly economic analysis of the HS, the irradiance and wind speed data for 2019 were taken in the city of Bogotá, which are shown in Figure 2 and Figure 3, from a meteorological station located next to the equipment. According to the global solar radiation parameter, between the months of January to March, there is an increase in this variable, where its historical average is recorded at 4821 [h per day (XM, s.f.). The clarity index recorded is approximately 0,5 because the data does not show a significant deviation.



Figure 3. Monthly average wind speed.

Between the months from June to September, average wind speeds of 2,5 [m/s] could be recorded, this is due to the fact that the Sabana de Bogotá, the site where the HS is installed, is located at a high altitude and that receives the impact of winds with speeds higher than the annual average speed.

LOAD PROFILES

The changes in the generation of the sources that make up the HS are also a consequence of the variation in the magnitude of the load on an hourly basis, also considering the meteorological conditions. To achieve the objective of evaluating energy management, it was decided to carry out computer simulations of electrical variables to be measured, such as voltage, energy demand, active power. Based on this information, the same for all the days on which climatic information was obtained, a model was implemented that characterizes the behavior of each source hourly.

A residential load profile and an industrial load profile were implemented in order to have knowledge of the behavior of the system's generation under certain load and weather conditions.

Residential profile

Figure 4 shows the chosen profile, which roughly describes residential behavior. The guide form for this profile was taken from the public information of XM-Expertos en Mercados company website (Cruz Lazo, 2010). This curve could describe the energy demand of a house, and to accurately predict its electricity consumption, it is essential to understand the determining factors that affect it, such as the most common devices used in the home, the consumption habits of its users. inhabitants, the place where they live, among other

factors (Hernandez and Carrillo, 2017). The graph was sized according to the installed capacity of the system, leaving an estimated clearance of 20% below and thus obtaining a maximum power value of 280 W.

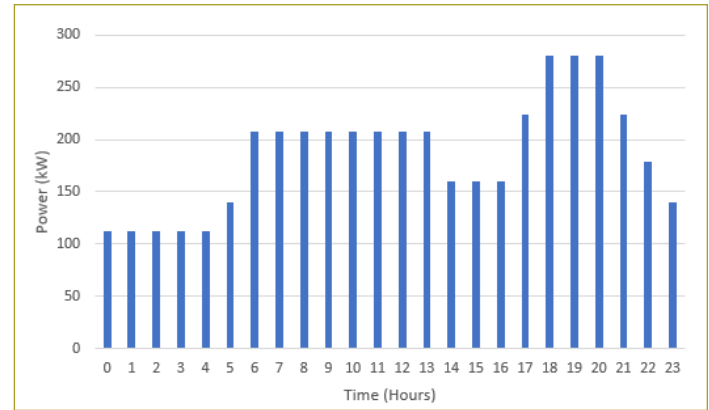


Figure 4. Residential profile.

Residential profiles are distributed in eight resistance values, as shown in Table I, in order to observe drastic changes in demand as well as in generation behavior.

Table I
Resistance and power values

Hour	0-4	5	6-13	14-16	17	18-20	21	22	23
R[Ω]	25,7	20,5	13,8	18	12,8	10,2	12,8	16	20,5
P[W]	112	140	207	159	224	280	224	179	140

Industrial profile

In general terms, when we talk about industry we refer to large processes with multiple generation, transformation and loading equipment in the production chains in order to obtain a final product that will be sold to the company's clients. Based on the above, the choice of electrical load (Electric Load Management or LM) can be defined as the actions carried out to change its profile in order to achieve a peak load of the total system. The objective is for the profile to be as uniform as possible as shown in Figure 5 with the purpose of planning its production, storing energy, introducing energy efficiency measures specifically focused on the moment of peak consumption and thus reducing reactive power and correcting the power factor.

It was decided to study and take this profile into account in the analyzes carried out, since these types

of profiles are the most common and the most used in large processes where a large amount of energy is consumed, therefore, the system must respond differently under the presence of this profile than if it were connected to the profile of residential demand. The system must give priority and guarantee the energy demanded by the load at a certain time instead of storing it, increasing the amount of energy fluid taken from the network, although at that time the project works as a way of saving.

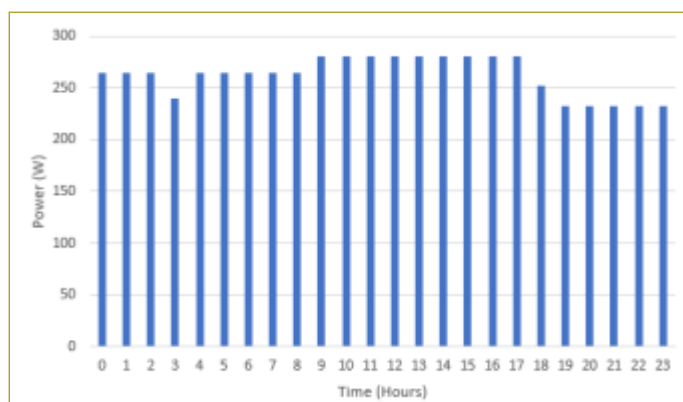


Figure 5. Industrial profile.

Similar to the previous profile, Figure 5 was sized according to the installed capacity of the system, leaving an estimated clearance of 20% below and thus obtaining a maximum power value of 280 W, as shown in Table II.

Table II
Resistance and power values

Hour	0-2	3	4-8	9-17	18	19-23
R[Ω]	10,91	12	10,91	10,3	11,43	12,41
P[W]	264	240	264	280	252	232

Description of obtaining load profiles

The electrical demand of a system is the intensity of current, or electrical power, relative to a specific time interval, that absorbs its load to function. This period is called the demand interval, and its indication is mandatory in order to interpret a certain demand value (Espina, 2017). In order to have an approximate value of the electrical variables of the HS during the day, the characterization of the equipment that makes up the

system was carried out, taking their nominal power from there. The following are going to be used: two 340 Wp photovoltaic solar panels Brand Sunset, a 400W wind turbine Brand Aleko and two 12V 48 Ah Hoppecke batteries connected in series. Table III presents the installed capacity of the hybrid generation system under nominal equipment manufacturing conditions.

Table III
Installed capacity of HS

Source	Units	Power per source [W]	Total power [W]
Photovoltaic modules	2	340	680
Wind turbine	1	400	400
Batteries	2	261,815	523,63
Total			1603,63

MODEL PREDICTIVE CONTROL

A predictive control model (MPC) is an advanced process control method that has been used by industry in numerous processes since the 1980s, in recent years it has also been used in stability models for electrical power systems. The main advantage of the MPC is the fact that it allows the immediate time slot to be optimized, while also taking into account future time slots or intervals. The MPC is based on the optimization of processes and finite horizon based on a plant model. At time t the current state of the plant is sampled and a control strategy that minimizes cost is computed for a relatively short future time horizon: $[t, t+T]$ (Zambrano and González, 2013).

Based on the previous explanation, the objective of the MPC is to find a future trajectory of the variable that was chosen to be manipulated, u . A prediction horizon N is set for which future outputs will be predicted at every instant. This is possible by implementing a prediction model that describes the behavior of the process variables to control, and which resides in the controller. Predictions depend on the known values until the moment and future control signals. The solution to the problem results in a vector containing the future control actions whose dimension depends on the control horizon, however, only the first element of this new vector must be sent to the plant.

It should be clarified, there is always a disturbance that cannot be measured, it represents all the unknown and unpredictable events that disturb the operation of the plant. The MPC model uses powerful linear dynamic modeling tools found in control systems and system identification. The model consists of:

- A plant model to be controlled, whose inputs are variables that can be manipulated, disturbances that can be measured, and disturbances that cannot be measured.
- A model that allows unmanageable disturbances.

Plant model is a time invariant linear system described by the following equations (1) to (3):

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{d}(k) \quad (1)$$

$$y_m(k) = C_m x(k) + D_{vm} v(k) + D_{dm} d(k) \quad (2)$$

$$y_u(k) = C_u x(k) + D_{yu} v(k) + D_{du} d(k) + D_{uu} u(k) \quad (3)$$

where x is the state vector of the plant, u is the vector of the manipulated variables (MV), d is the vector of the measurable disturbances (MD), u_d is the vector of the disturbances that cannot be measurable (UD) entering the plant, y_m is the vector of the outputs that are measurable (MO), and y_{um} is the vector of the outputs that are not measurable (UO). Therefore, due to the above, the general output vector, y , collects the information of y_m and y_{um} (Bemporad, Morari and Ricker 2005).

On the one hand, the model is made up of two fundamental structures for its correct operation: an MPC block in charge of making the generation forecast by source for the next day and a plant block, in which the system is graphically displayed taking into account all the elements that make up the same and connections between them. It is to clarify that the data used in Figure 6 were measured and used in the present simulation.

On the other hand, the plant model is the one shown in Figure 7, where each component that makes up it will be explained later. Each element was arranged in such a way that when the simulation is compiled, each energy source acts under the proposed prediction model, thus obtaining generation results in the short term and in the stipulated time.

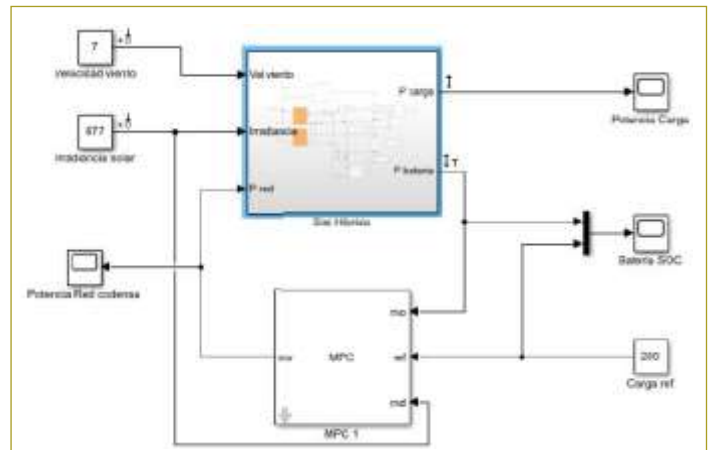


Figure 6. Block diagram of the MPC model in Simulink.

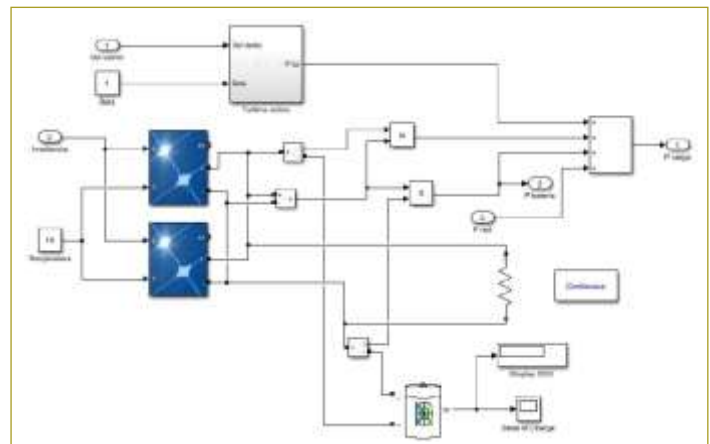


Figure 7. Block diagram of the plant model in Simulink.

ELECTRIC MODEL

HS is also known as an electrical energy source that can operate in two main scenarios: island mode or interconnected to the grid. The first is when the cluster is separated from the main electrical system and in this way, it can function autonomously according to the conditions of its operating infrastructure. The second case is the one that this document will deal with, where the grouping of the equipment is connected to the local distribution system (SDL) in order to consider a more efficient and safe distribution structure (Andrango, 2018). Figure 8 shows the one-way diagram captured in the corresponding software with the n of running a load flow at time $t = 0$, that is, on the day the measurement was made at 9:00 in the morning. Every day for later the information provided by the software is entered into the energy management model

and the prediction of the next day of power generation is evaluated.

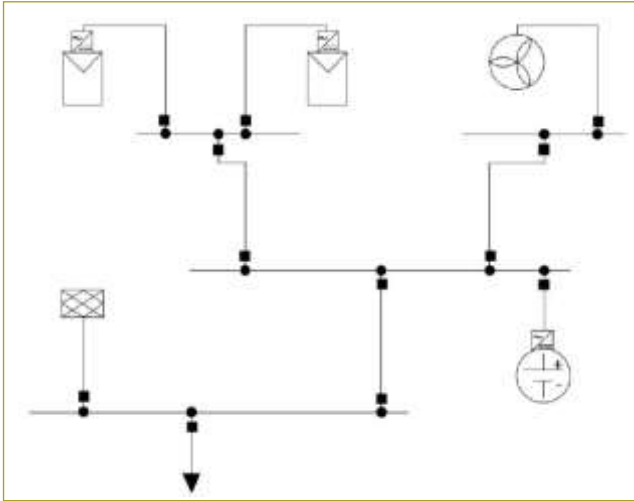


Figure 8. One-way diagram in DigSilent software.

DigSilent software can be programmed so that said power flow is carried out by the Newton-Raphson method since it is desired to find out the solution to a system of non-linear equations at a specific moment of the day. Equations (4) and (5) are used in order to find out the calculated values of the real power and the total reactive power that enters the HS through the bus AC in which it is called typical bar i , and which in turn is the network connected:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (4)$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (5)$$

Then, equations (6) and (7) name the calculated value of P_i as a calculated value and the definition of the error is reached as the programmed value minus the calculated value,

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} \quad (7)$$

The resulting power will be found varying since the conditions of the solar and wind resources are not

constant over a previously established period. That generated energy will also vary as the load varies, which is why an estimate of the fluid that will be consumed is made in order to provide possible contingencies if the meteorological conditions are not favorable. Solar irradiance and wind speed data were taken from the website of the *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (IDEAM). These data were collected with monthly resolution in order to have a more general concept of the behavior of HS throughout the year (IDEAM, 2016).

ECONOMIC AND FINANCIAL ANALYSIS

For the economic modeling of the SH, the HOMER energy software was used, a tool that allows the design of renewable energy projects, oriented to SH's, which as a result shows a viable system for all possible combinations of the system to be considered.

This means that the calculations are made according to the equipment that makes up the system, but it does not give us the possibility of including a new one with the purpose of increasing both electricity generation and the profitability of the HS. HOMER energy uses net current cost (NPC) to represent the life cycle cost of a given system. The total NPC unites all costs and revenues that occur over the life of the project, with future cash flows discounted to the present using the discount rate.

The income is made up of the sale of energy to the network, plus any salvage value that the system may produce at the end of its useful life. To calculate the salvage value of each component at the end of the exercise, the software uses the equation (8).

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (8)$$

where S is the salvage value, the replacement cost of each component, the remaining useful life of the component and the useful life of the component. HOMER uses the equation (9) to calculate net present cost.

$$C_{NPC} = \frac{C_{an,tot}}{CRF_{i,N}} \quad (9)$$

where C is total annualized cost, i is the discount rate, N is the Project Life, and CFR is the capital recovery factor, calculated by equation (10).

$$CFR(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (10)$$

Nevertheless, HOMER calculates cost of energy by equation (11).

$$COE = \frac{C_{an,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{sales\ to\ the\ grid}} \quad (11)$$

where E_{prim} and E_{def} are the total amounts of primary and deferrable load, respectively, that the system serves per year, and E_{sales} is the energy that was sold to the grid (Lambert, Gilman and Lilienthal 2006).

Since a unimodal study is carried out, the corresponding block diagram of the set of equipment is the one shown in figure 9.

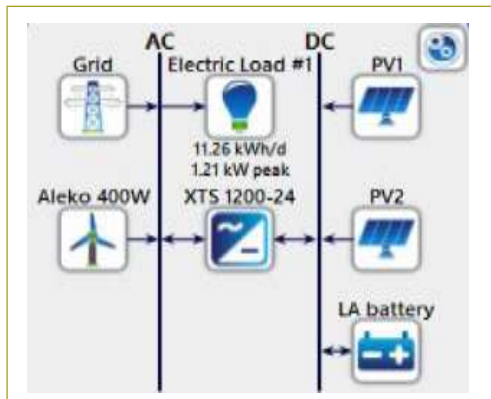


Figure 9. Block diagram in HOMER energy software.

For the financial modeling of the HS, the *RETScreen* expert software, developed by the Government of Canada, was used. It allows modeling and analyzing all that project that involves clean energy. Thus, a set of analyses can be carried out: energy, cost, emissions, financial and sensitivity and risk. *RETScreen* allows you to select the location of the project from among a variety of cities in the country, and associates meteorological data extracted from the NASA database with each one, so it is possible to perform the pertinent calculations to adapt the energy demands of the place selected.

Photovoltaic systems have few components, and their behavior is not linear, so it becomes a little more complicated to model. However, *RETScreen* uses simplified algorithms to minimize data requirements and to speed up calculations, while maintaining an acceptable level of precision. In turn, wind systems are another complex technology to model since they have more parts and are the reason why the project can make the initial capex more expensive.

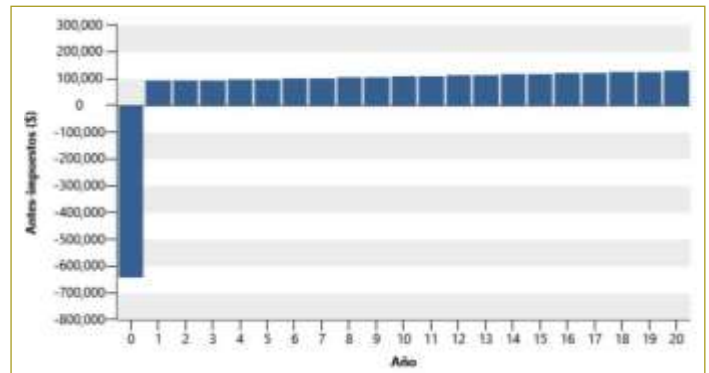


Figure 10. Annual cash flow of the project before taxes.

On the horizon of the twenty years that were considered as the useful life of the project, figure 10 shows indicators that account for the exceeding of the zero margin, that is, the abscissa line. Consequently, either the cost structure of the business is not out of date with respect to the realities of the market or the financing by the shareholders has been sufficient. It is an indicator of the result of a company when taking into account the interests and financial costs, which depend on the way in which the project is financed and therefore, the interest rates.

If we refer to the accumulated flow of the effect during the year, figure 11, an increase in cash flow is observed, proportional to that shown in the distribution before taxes, which is derived from the savings generated by the system over the horizon of stipulated time. It is evident that the annual distribution of the net present value is positive all the time, this is because the load demanded the energy generated from renewable sources and there was no need to take electricity from the grid, thus generating savings in monthly billing.

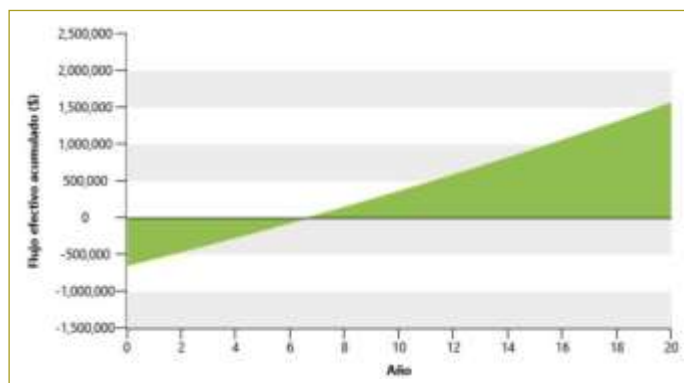


Figure 11. Accumulated cash flow of the project.

For the purposes of simplifying the calculations, only the results obtained for the residential profile will be shown. Table IV shows three main metrics that describe the viability of the project. Internal rate of return shows us a relative measure of profitability, the main problem is that based on the number of periods, the order of the equation to be solved would correspond, the higher this percentage, in less time the initial investment is recovered. It is a viable project since, based on the initial investment, the IRR is high enough to recover the total amount initially invested in a period of less than 5.7 years. The return on investment (ROI) variable is located at an important value since 0.121 pesos of profit is being recovered for each peso invested in the project.

Table IV
Economic metrics of the project

Economic metrics	Value
IRR	16.3 %
ROI	12.1 %
Retribution	5.7 years

CONCLUSIONS

MPC control gives the possibility of having knowledge of the value that the variables will take in the short term, giving a vision to the user of how the sources that make up the system will behave and therefore if, under said prediction, it is possible to meet the previously established demand.

Hybrid systems are currently implemented and taken into account to provide energy to those vulnerable areas where a transmission line does not have access. At the

same time, it is important to have control over energy to use it correctly and not misuse it.

Economic and financial results showed that under the residential profile scenario both the IRR and the return of investment (ROI) (16.3% and 12.1% respectively) are higher than if we consider the case of the industrial profile (9.8% and 6.6% respectively), cause in the residential profile there are hours that can be covered only with renewable generation, also depending if considered important weather conditions.

Finally, results obtained for both load or demand profiles indicate that the SH cannot be working in island mode or disconnected from the grid for a considerable time and especially at the moment when the load demands a greater amount of energy since the contributions of the sources would not be enough to supply said consumption of the end user. In contrast to the above, this SH, as described in this document, is reduced only to a project that can generate significant savings at the time of implementation, and as an alternative in case the generation of the SH does not be enough, the network would be used as a backup.

REFERENCES

- Andrango, B. I. (2018). *Operación de protecciones en micro-redes basado en flujos óptimos de potencia ac*. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- Bemporad, A. Morari, M. and Ricker, N.L. (2005) *Model Predictive Control Toolbox for Use with MATLAB*. MathWorks, User guide, version 2.
- Cruz Lazo, E. G. (2010). *Diseño y simulación del comportamiento de un sistema híbrido de potencia*, Universidad de Piura.
- Espina, J. (2017). *Carga, demanda y energía eléctrica: Conceptos fundamentales para la distribución de electricidad*. (3 ed) [Online] Available at: <http://www.sectorelectricidad.com/17597/carga-demanda-y-energia-electricaconceptos-fundamentales-para-la-distribucion-de-electricidad/>
- Hernandez, K. and Carrillo, J. (2017). *Análisis de la curva de demanda eléctrica para usuarios residenciales estrato 4 en la ciudad de Bogotá ante diferentes escenarios de los hábitos de consumo*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, pp.60-75.
- IDEAM. (2005). *Introducción al Atlas Interactivo*, [Online]. Available at: <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- IDEAM. (2016). *Altos valores de radiación solar en Bogotá y gran parte de la region Andina (2 ed)* [On Line] Available at: <http://ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/assetpublisher/LdWW0ECY1uxz/content/el-ideam-advierde-por-altos-valores-de-radiacion-ultravioleta-en-el-primer-semester-de-2018>
- Lambert, T., Gilman, P. and Lilienthal, P. (2006). *Micropower System Modeling with Homer*. Integration of Alternative Sources of Energy, pp.379-418.

- Marnay, C. (2016). *Chapter 3 - Microgrids: Finally Finding their Place*, Future of Utilities, Utilities of the Future, Academic Press, Pages 51-74.
- Osorio, M. (2012). *Micro-redes híbridas autónomas, opción para la electrificación rural en Latinoamérica (2nd ed)* [Online] Available at: <http://latinoamericarenovable.com/2012/10/03/micro-redes-hibridas-autonomasopcionparalaelectrificacion-rural-en-latinoamerica/>
- XM, (s.f.) *Portal BI*. [Online] Available at: <http://portalbissrs.xm.com.co/>
- Zambrano, J. and González, A. (2013). *Implementación de un algortimo de control predictivo en espacio de estados sobre una Plataforma de simulación desarrollada en MatLab*, Ingenius, No. 9, pp5-14.

Modelo de mercado eléctrico en el escenario de integración energética regional para América Latina

Electricity market model in the regional energy integration scenario for Latin America

YEFER ANDRÉS PÉREZ RÍOS¹ - AGUSTÍN RAFAEL MARULANDA GUERRA²

1. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7303-4287>.

2. Doctor en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Sevilla, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6739-2641>.

yefer.perez@mail.escuelaing.edu.co - agustin.marulanda@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/08/2025 Aceptado: 25/09/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La integración energética impulsa el desarrollo de modelos de energía transnacionales en el esquema vinculante de agentes de generación y transmisión de energía. Latinoamérica y el Caribe cuenta con reservas de petróleo, gas natural, carbón mineral, potenciales hidroeléctricos y solares —incluido el viento—, pero su capacidad instalada de generación eléctrica es naciente, así como el consumo de electricidad.

La revisión de bibliografía especializada de modelos de integración energética regional y mercados eléctricos regionales existentes permite elaborar el modelo matemático que optimiza el despacho económico programado, maximizando el bienestar social de los agentes que participan.

El escenario para probar el rendimiento del modelo valora dos perspectivas: el despacho económico tradicional y la priorización de energías renovables. Se encuentra que el modelo fija precios de acoplamiento que hacen posibles las transacciones internacionales de electricidad y que el valor del mercado es significativamente mejor, priorizando energías renovables en contraste con el despacho tradicional; por lo tanto, el modelo desarrollado garantiza la integración de Latinoamérica y el Caribe como región, reduce la incertidumbre en el despacho de las fuentes renovables de energía convencionales y no convencionales, y fija el esquema para el intercambio de energía eléctrica de manera sostenible en la región latinoamericana.

Palabras claves: integración energética, energías renovables, nodos, intercambio de energía eléctrica.

Abstract

Energy integration drives the development of transnational energy models within the binding framework of energy generation and transmission agents. Latin America and the Caribbean have reserves of oil, natural gas, coal, hydroelectric and solar potential -including wind-, but their installed electricity generation capacity is nascent, as is electricity consumption.

A review of the specialized literature on regional energy integration models and existing regional electricity markets has made it possible to develop a mathematical model that optimizes scheduled economic dispatch while maximizing the social welfare of the participating agents. The scenario for testing the model's performance evaluates two perspectives: traditional economic dispatch and the prioritization of renewable energies. It finds that the model sets coupling prices that enable international electricity transactions and that the market value is significantly better when prioritizing renewable energies in contrast to traditional dispatch. Therefore, the developed model guarantees the integration of Latin America and the Caribbean as a region, reduces uncertainty in the dispatch of conventional and non-conventional renewable energy sources, and establishes the framework for sustainable electricity exchange in the Latin American region.

Keywords: energy integration, renewable energies, nodes, sustainable electricity exchange.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el intercambio de energía eléctrica entre los países miembros de la Comunidad Andina de Naciones (CAN) (Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia) se rige mediante el marco regulatorio para la interconexión subregional de sistemas eléctricos e intercambio intra-comunitario de electricidad, establecido mediante la Decisión CAN 816, en la que se establecen los principios del Mercado Andino Eléctrico Regional de Corto Plazo (MAERCP), que determina la metodología para efectuar intercambios de excedentes de energía eléctrica.

La referencia (Sandovalín y Arcos, 2024) tiene como objetivo simular varios escenarios de intercambio de energía del MAERCP mediante la herramienta computacional Python y valorar los precios de liquidación comercial en el despacho económico coordinado (Barroso, Muñoz, Bezerra, Rudnick y Cunha, 2024; Sánchez y Madeleine, 2021; Mehdi, Taghi, Reza, Bashooki, Ameli y Strbac, 2018; Farrokhabadi, Browell, Wang y Makonin, 2024; Su y Zareipour, 2022), además de sus efectos en el sistema interconectado ecuatoriano. Se concluye, entonces, que para abastecer la demanda interna de energía eléctrica en Ecuador y Perú se deben importar bloques de energía, porque el costo de generación es elevado en comparación con Colombia.

En ese orden de ideas, a este último le favorecen las exportaciones y debe evitar las compras de energía en el exterior, además de generar aproximadamente el doble de energía que Ecuador y a un costo mucho menor. Según Dias y Guimarães (2024), la integración eléctrica o integración de infraestructuras y cadenas de producción de energía en el contexto regional es un tema ampliamente citado en la geopolítica energética, especialmente en la perspectiva latinoamericana; por tal razón, el propósito de esta investigación es analizar la integración eléctrica en el Mercado Común del Sur (Mercosur) y la CAN, con el propósito de conocer por qué la integración regional ha generado resultados insuficientes hasta el momento.

Para esto, se hizo una revisión bibliográfica con el fin de identificar los beneficios y desafíos, y se pudo concluir que existen ventajas por medio de la integración eléctrica y el uso eficiente de los recursos energéticos complementarios (Garnero, Trombetta y Merino, 2024; Acero y Ríos, 2021; Yinya, Xia, Huihong, Yang, Ze y Kejie, 2024; DeLima, Franco, Lezama y Soares, 2022; Simoes, 2024).

Adicionalmente, la diversidad de recursos energéticos en el Mercosur es evidente; por ejemplo, Paraguay, donde la electricidad se soporta en hidroeléctricas y está controlada por el Estado, puede generar energía a bajo costo y satisfacer la demanda interna; a su vez, Brasil y Uruguay, que tienen una alta capacidad de energía, generada a partir del agua, poseen una matriz eléctrica diversificada, con inversiones en fuentes de energía renovables (FER), mientras que Argentina, aunque su matriz energética sea polivalente, está centralizada en termoeléctricas.

Si bien existen exportadores e importadores de energía sujetos a las condiciones climáticas o la demanda interna, las experiencias están marcadas por intercambios energéticos bilaterales, basados en acuerdos específicos. El Mercosur cuenta con interconexiones eléctricas capaces de integrar a todos los países que lo componen, por intermedio del Fondo para la Convergencia Estructural del Mercosur (Focen) (Fernanda y Colombo, 2020).

Por último, la CAN emitió la Resolución 2402 (Gutiérrez, 2024), en la cual se establecen el reglamento operativo y comercial y las funciones y responsabilidades del coordinador regional; no obstante, las operaciones de intercambio de electricidad se siguen efectuando a través del Mercado Andino Eléctrico Regional de Corto Plazo (MAERCP) y no del Mercado Andino Eléctrico Regional (MAER), como se pretende.

En respuesta a la falta de proyectos de energía solar fotovoltaica en los países del Mercado Eléctrico Regional (MER), se analizó el impacto económico del acoplamiento de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica con baterías (SAEB) en los proyectos solares fotovoltaicos (PV) instalados en el Sistema Eléctrico Regional (SER) centroamericano; además, se compararon los costos operativos y marginales del sistema para conocer el impacto económico en la operación del SER después de la inclusión de SAEB en proyectos solares PV (Celada y Pozuelos, 2024). Esto se hizo mediante la simulación de la operación del SER con el modelo de optimización programación dinámica dual estocástica en un horizonte de quince años (2023-2038), desde dos escenarios: SAEB acoplado a proyectos solares PV y SAEB sin el acoplamiento, como es en la actualidad.

Los resultados obtenidos muestran un impacto económico positivo por la incorporación de SAEB debido a que el costo operativo total del SER y los costos marginales del sistema se reducen, en comparación

con los valores sin SAEB. Igualmente, la variación de los precios marginales sin SAEB demuestra que esta opción permite una mayor optimización de los recursos disponibles para suministrar la energía demandada (Barroso, Muñoz, Bezerra, Rudnick y Cunha, 2021; Ruiz y Balestro, 2024; Undurraga, Rivera, Cossutta, Garcés, Ayala, García y Wheeler, 2024).

Según lo explican reconocidos investigadores (Silverman, Wendling, Rizal y Samant, 2024), en Estados Unidos crece rápidamente la necesidad por la generación de electricidad renovable, impulsada por el interés de la demanda y el objetivo del país de contener las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, los proyectos de esta envergadura necesitan un mayor plazo desde su diseño hasta la ejecución, porque requieren estudios y actualizaciones que el operador de red debe hacer antes de garantizar una conexión segura y confiable.

Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection (PJM) es el mayor operador de red del país y está experimentando los retrasos de la generación renovable, porque proyectos que esperan para ser acoplados tienen bajas posibilidades antes del 2030. En el desarrollo de este informe se presentan los resultados de encuestas hechas a los desarrolladores de proyectos en el mercado PJM, para comprender los impactos de los retrasos en el proceso de interconexión, y se ha encontrado que son consecuencia fundamentalmente de una red de transmisión que no está dimensionada para acoger la nueva generación renovable (Yinya, Xia, Huihong, Yang, Ze y Kejie; Newlun, McCalley, Amitava, Jahanbani, Venkatraman y Figueroa, 2021; Michaelis, Hanny, Körner, Strüker y Weibelzahl, 2024), y los participantes necesitan dos o más años antes de alcanzar la operación comercial, incluso después de completar el proceso de interconexión formalmente; además, los permisos específicos del sitio y la aprobación de ubicación expiran luego de un periodo de inactividad que normalmente es menor que la solicitud de acoplamiento a la red.

METODOLOGÍA

El modelo de optimización bienestar social diario (BSD) permite realizar el despacho económico programado asegurando el equilibrio del sistema y priorizando a los generadores más baratos con programación lineal entero mixta (MILP, por su sigla en inglés); sin embargo, no

considera el número de nodos existentes y tampoco es posible calcular los flujos de energía a través del sistema de transmisión (Sánchez y Madeleine, 2018).

La función objetivo ecuación 1 maximiza la diferencia entre el precio ($\pi_{t,j,k}^{D^{original}}$) multiplicado por la cantidad ($q_{t,j,k}^{bid^{original}}$) de la demanda atendida de todos los comercializadores j en el bloque k y el costo ($\pi_{t,i,b}^G$) multiplicado por la cantidad ($q_{t,i,b}^{offer}$) de la oferta despachada de todos los generadores i en el bloque b para todos los periodos t .

$$\max \sum_{t \in T} \left(\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(\pi_{t,j,k}^{D^{original}} \cdot q_{t,j,k}^{bid^{original}} \right) - \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} \left(\pi_{t,i,b}^G \cdot q_{t,i,b}^{offer} \right) \right) \quad (1)$$

La restricción ecuación 2 limita la máxima compra aceptada para el agente comercializador y la suma de todos los bloques ofertados es la demanda máxima de este ($prurchase_{t,j,k}^{original}$).

$$q_{t,j,k}^{bid^{original}} \leq purchase_{t,j,k}^{original} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2)$$

La restricción ecuación 3 limita la máxima venta aceptada para el agente generador y la suma de todos los bloques ofertados es la capacidad máxima de generación de este ($sale_{t,i,b}$).

$$q_{t,i,b}^{offer} \leq sale_{t,i,b} \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall b \in B \quad (3)$$

La restricción ecuación 4 garantiza el equilibrio del sistema eléctrico con la igualdad entre la generación y la demanda aceptada; además, crea una variable dual (π_t^M) que almacena el precio marginal del mercado cada vez que la restricción de igualdad existe.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} q_{t,j,k}^{bid^{original}} = \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} q_{t,i,b}^{offer} : \pi_t^M \quad \forall t \in T \quad (4)$$

Las restricciones ecuaciones 5 y 6 presentan la demanda total atendida ($q_t^{Bid^T}$) y la generación total despachada ($q_t^{Offer^T}$), respectivamente.

$$q_t^{Bid^T} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} q_{t,j,k}^{bid^{original}} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$q_t^{Offer^T} = \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} q_{t,i,b}^{offer} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

Finalmente, la restricción ecuación 7 garantiza que los valores aceptados para la generación y la demanda sean positivos o iguales que cero.

$$q_{t,j,k}^{bid^{original}}, q_{t,i,b}^{offer} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall i \in I, \forall b \in B \quad (7)$$

Por lo tanto, se proponen las siguientes modificaciones sobre la función objetivo ecuación 1 y la restricción ecuación 4, expresadas en 8 y 12, respectivamente, y se agrega una nueva restricción ecuación 13.

La función objetivo maximiza el BSD ecuación 8 y está definida como la suma de todos los periodos t , de la diferencia entre la oferta aceptada en el nodo n de la demanda j en el bloque k ($offer_{t,n,j,k}$), multiplicada por la postura en el nodo n de la demanda j en el bloque k ($bid_{t,n,j,k}$) y el suministro aceptado en el nodo n del generador i en el bloque b ($supply_{t,n,i,b}$), multiplicado por el precio en el nodo n del generador i en el bloque b ($price_{t,n,i,b}$).

$$\max \sum_t \sum_n \left(\sum_j \sum_k (offer_{t,n,j,k} \cdot bid_{t,n,j,k}) - \sum_i \sum_b (supply_{t,n,i,b} \cdot price_{t,n,i,b}) \right) \quad (8)$$

Las ofertas aceptadas en el nodo n de la demanda j en el bloque k son limitadas por la compra máxima ($purchase_{t,n,j,k}$) en 9, al igual que los suministros en el nodo n de los generadores i en el bloque b son limitados por la generación máxima ($sale_{t,n,i,b}$) en 10. Adicional-

mente, la ecuación 11 establece que los valores para las ofertas y los suministros aceptados sean positivos.

$$offer_{t,n,j,k} \leq purchase_{t,n,j,k} \quad (9)$$

$$supply_{t,n,i,b} \leq sale_{t,n,i,b} \quad (10)$$

$$offer_{t,n,j,k}, supply_{t,n,i,b} \geq 0 \quad (11)$$

A partir de la revisión del modelo de planeamiento DC presentado (Pérez y Marulanda, 2016), la ecuación 12 define la restricción para el equilibrio del sistema como la igualdad entre la suma total de las ofertas y los suministros y flujos en las líneas de transmisión ($flow_{t,l}$) multiplicados por la matriz de incidencia de nodo línea ($S_{n,l}$), garantizando que la generación sea igual a la demanda; además, se crea una variable dual que permite conocer los precios nodales (*nodalprice*) para el sistema.

$$\sum_j \sum_k offer_{t,n,j,k} = \sum_i \sum_b supply_{t,n,i,b} + \sum_l flow_{t,l} \cdot S_{n,l} : nodalprice_{t,n} \quad (12)$$

La ecuación 13 restringe los flujos a la capacidad máxima de las líneas de transmisión ($maxflow_{t,l}$) en ambos sentidos. Finalmente, las ecuaciones 14 y 15 se definen para presentar la generación y la demanda de cada nodo del sistema en las franjas horarias programadas.

$$flow_{t,l} - flow_{t,l} \leq maxflow_{t,l} \quad (13)$$

$$totaloffer_{t,n} = \sum_j \sum_k offer_{t,n,j,k} \quad (14)$$

$$totalsupply_{t,n} = \sum_i \sum_b supply_{t,n,i,b} \quad (15)$$

En consecuencia, es posible realizar el despacho económico programado con este algoritmo de optimización considerando los nodos existentes en el sistema, los precios nodales de la energía y las restricciones de flujo en la red de transmisión. El mercado debe conocer las restricciones que existen en el sistema de transmisión del que participa, como capacidad de la línea y costo del uso de la red.

En el modelo de optimización, la función objetivo establece el valor total del mercado para el día de programación; ($offer_{t,n,i,k}$) permite conocer las ofertas aceptadas de los agentes generadores en cada nodo n y periodo t ; ($supply_{t,n,i,b}$) permite conocer las ofertas aceptadas de los comercializadores en cada nodo n y periodo t ; ($flow_{t,l}$) muestra los flujos en el sistema de transmisión regional en cada enlace internacional y periodo t ; ($nodalprice_{t,n}$) ilustra los precios nodales que fija el mercado para remunerar las ofertas aceptadas tanto de agentes generadores como comercializadores en cada nodo n y periodo t ; ($totaloffer_{t,n}$) y ($totalsupply_{t,n}$) registran los valores de demanda y generación, respectivamente, en cada nodo n del sistema durante los periodos t .

CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

A continuación se presenta el escenario para valorar el rendimiento del modelo desarrollado, en el que se consideran los países participantes de la CAN, incluyendo a Chile. Inicialmente, se modela un sistema de transmisión regional de alta tensión en 230 kV que abarca los países mencionados, y se hace uso de las interconexiones nacionales que existen en la actualidad, corredores de línea continua entre Colombia, Ecuador, Perú y Chile (figura 1), además de las que se encuentran en el planeamiento de transmisión nacional de cada uno, corredor de línea seccionada entre Bolivia y Perú (figura 1), para que sea posible implementar el mercado eléctrico regional.

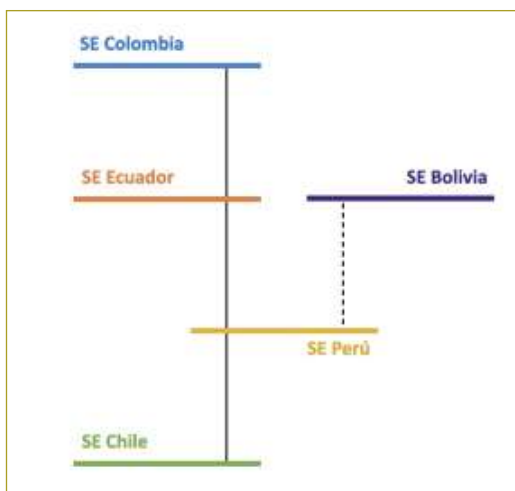


Figura 1. Esquema unifilar de Latinoamérica y el Caribe

Fuente: Elaboración propia (2025).

Así mismo, se proponen tres agentes generadores y cinco comercializadores, que presentan sus respectivas curvas de oferta y demanda en todos los nodos del sistema, con precios nodales que se acercan a los reales consultados en Global Petrol Price (2024). La demanda local de cada país se considera atendida en su totalidad y solamente colaboran en el mercado eléctrico regional los agentes con excedentes de energía y que no se encuentren obligados a participar en sus respectivos mercados locales o tienen restricciones, como contratos de energía en firme.

Adicionalmente, según la curva de la demanda promedio de los países del caso de estudio (figura 2), se restringe la cantidad de energía despachada por el mercado eléctrico a un tercio del valor de la demanda diaria de cada nación.

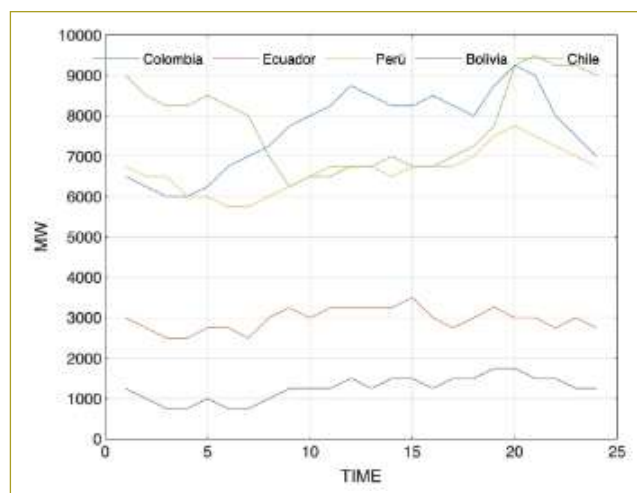


Figura 2. Curva de demanda de países latinoamericanos

Fuente: Elaboración propia (2025).

Se analizarán dos escenarios de estudio: uno sin la priorización de las fuentes renovables de energía no convencional, lo que implica que no existen beneficios o incentivos que permiten a estos generadores ser despachados en primera instancia, y otro con la priorización de estos para conocer cuál es su impacto en el despacho económico tradicional (figura 3).

Las características propias de los nodos del sistema eléctrico regional propuesto se ilustran en la tabla siguiente (tabla 1), en la que se evidencia que Chile es el único país con una frecuencia diferente de la de los demás, lo cual se pudo inferir de los requisitos técnicos para el acoplamiento por medio de los enlaces internacionales del mercado eléctrico regional.

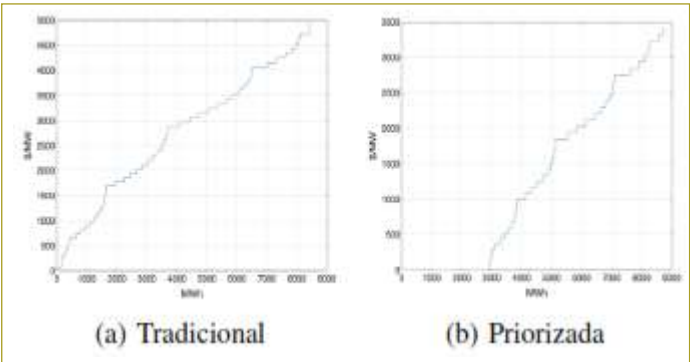


Figura 3. Curva agregada de oferta y demanda
Fuente: Elaboración propia (2025).

La capacidad de los enlaces internacionales candidatos se ilustra más adelante (tabla 2). En este modelo no se consideran los precios por congestión en la red o peajes internacionales, pero este valor se puede estimar por la cantidad de energía que transita por el corredor internacional con un porcentaje de penalidad.

Tabla 1
Nodos del mercado eléctrico regional

Nodo	Frecuencia Hz	Tensión kV	Precio de bolsa USD/MWh
Colombia	60	230	205
Ecuador	60	230	95
Perú	60	230	175
Bolivia	60	230	110
Chile	50	230	175

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 2
Sistema eléctrico de transmisión regional

Línea	Capacidad MW	Longitud km	Tensión kV
Colombia-Ecuador [22]	460	210	230
Ecuador-Perú [23]	680	250	230
Perú-Bolivia [24]	200	70	230
Perú-Chile [25]	120	60	230

Fuente: Elaboración propia (2025).

La simulación del despacho económico se desarrolla a través del *software* de optimización GAMS® y el *solver mixed integer programming* (MIP); los resultados se presentan en Matlab®.

Despacho económico tradicional

En condiciones normales, en este despacho los agentes generadores presentan sus ofertas al mercado, al igual que los comercializadores sin beneficios o que sean priorizados por ser fuentes renovables (figura 3a).

Así se podrán conocer cuáles serán las ofertas aceptadas por el mercado que permitan garantizar la maximización del DSW, velar por la estabilidad del sistema eléctrico y no sobrepasar los límites de transporte de energía del sistema de transmisión regional, además de conocer los precios nodales del sistema, considerados como precios de acoplamiento del mercado eléctrico.

Cómo priorizar energías renovables

Adicionalmente, se realiza un nuevo despacho económico, tomando en cuenta las ofertas de los agentes generadores renovables (1), con costo marginal de generación igual a cero, para que se despachen en primera instancia (figura 3b) y así poder priorizar el uso de las fuentes renovables en el sistema, garantizando los mismos principios del despacho tradicional.

Resultados

A renglón seguido se muestran los resultados obtenidos para las ofertas y posturas aceptadas, sin priorizar las fuentes renovables. Se puede observar el equilibrio del mercado eléctrico regional porque tanto la gráfica de generación como la de demanda son iguales si se superponen (figura 4).

Además, esto permite identificar la cantidad de energía despachada y atendida en cada nodo del siste-

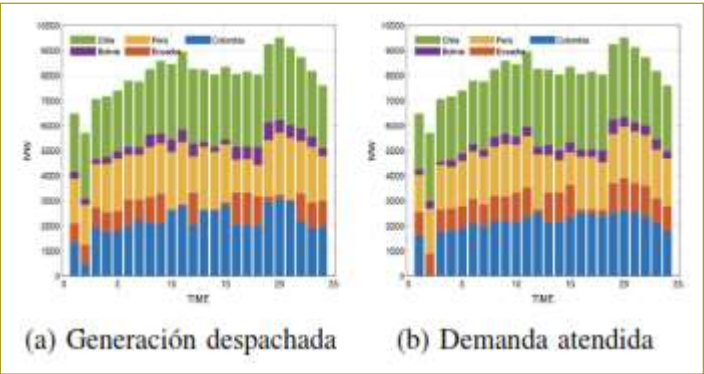


Figura 4. Despacho económico tradicional
Fuente: Elaboración propia (2025).

ma eléctrico regional, diferenciada en colores, como se planteó en la figura 1. Igualmente, se puede observar que la forma de la gráfica obedece a una curva de demanda tradicional para los países de Latinoamérica y el Caribe, con valores superiores en el horario de la mañana y sobre el cierre de la tarde, que son los horarios de mayor demanda residencial normalmente.

Así mismo, las ofertas y posturas aceptadas priorizando las fuentes renovables se ilustran en las mismas condiciones en la figura siguiente (figura 5). Sin embargo, acá es posible notar una participación mayor de la generación que corresponde a Ecuador (color naranja) y que al mismo tiempo desplaza ofertas de los otros nodos, evitando que sean aceptadas porque la demanda aceptada se mantiene casi igual para ambos escenarios.

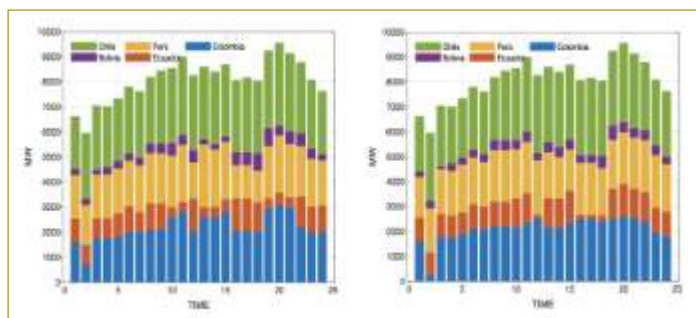


Figura 5. Cómo priorizar energías renovables

Fuente: Elaboración propia (2025).

A renglón seguido, se ilustran los precios de acoplamiento calculados para ambos escenarios durante todas las franjas horarias programadas y para cada uno de los nodos del sistema eléctrico regional. Es posible observar cuatro niveles de precios, que señalan los valores reales de la tabla 1 porque el precio promedio del mercado eléctrico de Perú y Chile es similar (figura 6).

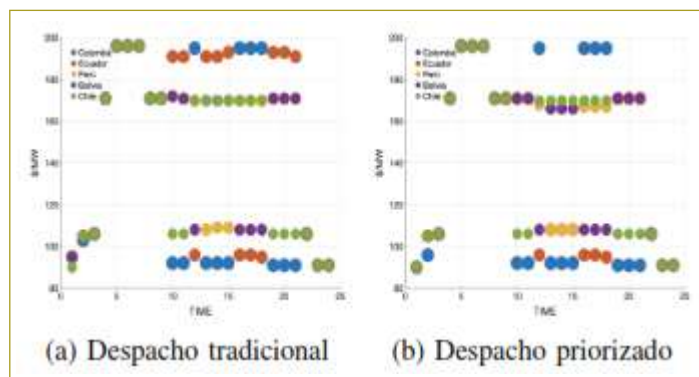


Figura 6. Precios nodales de acoplamiento

Fuente: Elaboración propia (2025).

En las franjas del día, por ejemplo, desde las tres hasta las nueve y desde las veintidós hasta las veinticuatro en el despacho tradicional (figura 6a), el precio nodal de acoplamiento es el mismo para todos los nodos del sistema, en comparación con otra que es dispar y se acerca al precio nodal real. Así, el mercado fija precios diferentes si se comparan los valores encontrados en las demás franjas y sucede de manera similar en el despacho priorizado (figura 6b).

En horas de baja demanda, el mercado eléctrico fija precios nodales bajos en comparación con las franjas horarias con mayor demanda, donde el precio que cierra o margina el mercado eléctrico es cercano a los más altos presentados por los agentes generadores y comercializadores; además, se puede observar que aunque el sistema eléctrico regional tiene cinco nodos con diferentes precios de oferta en momentos del día, el precio nodal de acoplamiento es igual para todos, si se lo compara con otras franjas horarias donde cambia y son dispares entre ellos. Finalmente, el modelo desarrollado establece precios nodales de acoplamiento que hacen posibles las transacciones internacionales de electricidad.

Adicionalmente, en la figura siguiente (figura 7) es posible observar que el modelo permite calcular los flujos de energía del sistema de transmisión regional que garantizan la estabilidad del mercado eléctrico, sin sobrepasar la capacidad máxima de los enlaces internacionales en ambos escenarios. Los valores negativos hacen referencia a flujos que regresan desde el nodo de destino hacia el origen.

Los flujos no conservan un comportamiento uniforme y lineal; por el contrario, varían en cada franja de programación durante el día porque el mercado eléctrico acepta o rechaza las ofertas que favorecen el

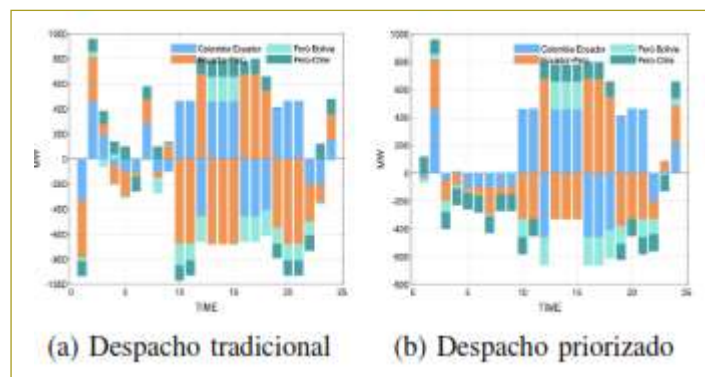


Figura 7. Flujos de enlaces internacionales

Fuente: Elaboración propia (2025).

BSD y, al mismo tiempo, considera las restricciones presentes en la red de transmisión regional; además, se espera que este sea de uso exclusivo para el mercado eléctrico regional.

El modelo de mercado eléctrico regional desarrollado permite promover el uso de las FER no convencionales y, a su vez, contribuir a la integración de Latinoamérica y el Caribe como región.

Este modelo permite incentivar la expansión del sistema de transmisión de energía eléctrica y sirve como referencia de mercado según el escenario de integración energética, en el que es posible identificar las características del mercado, la participación en bloques y remuneración hacia los agentes generadores y comercializadores, sin considerar la retribución económica que requiere el sistema de transmisión de energía o peajes internacionales.

Los escenarios presentados y valorados, despacho económico tradicional y priorizando energías renovables, se ilustran en la tabla siguiente (tabla 3), en la que se observa cómo la maximización del BSD es considerablemente mayor si las fuentes renovables son despachadas por el mercado en primera instancia.

Tabla 3
Valores del mercado

Solver	Daily Social Welfare		
	Time	Tradicional	Priorizado
Soplex	60 ms	2.298.982	12.590.732
Cplex	40 ms	2.298.982	12.590.732
Highs	20 ms	2.298.982	12.590.732

Dollars

Fuente: Elaboración propia (2025).

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado, permite realizar el despacho económico programado a través del mercado eléctrico regional para Latinoamérica y el Caribe, que considera los enlaces internacionales existentes y futuros del plan de expansión en los países seleccionados de la región de estudio.

El despacho priorizado de las FER no convencionales promueve la cobertura de más usuarios residenciales o industriales, y reduce los GEI señalando hacia una matriz de generación limpia y verde; además, aumenta el BSD de la región.

Este modelo de mercado favorece el uso de los potenciales solares de irradiancia y viento, aparte del recurso hidroeléctrico, con los que cuenta Latinoamérica y el Caribe en la actualidad, puesto que se reduce la incertidumbre de programación para las unidades de generación a base de las FER que participan en el modelo de mercado eléctrico regional elaborado, que puede contener grandes cantidades de ofertas y posturas durante cualquier periodo del día, algo que contrasta con la intermitencia de las FER en la actualidad.

Normalmente, los SAEB se consideran como alternativa para incluir a las FER en los mercados eléctricos; no obstante, esta solución hace que aumente el precio de la electricidad ofertado, socavando su posición aventajada en el sistema.

Además, este modelo fija precios nodales, con los cuales se remunera tanto a los agentes generadores como a los comercializadores participantes en el mercado. Dichos precios toman valores que se acercan a los reales, pero en periodos de alta demanda pueden ser dispares entre ellos; es más, el mismo mercado puede fijar un precio nodal para toda la región, en cualquier franja horaria del día.

Solamente dos de los cinco países seleccionados tienen el precio de bolsa similar; también es posible conocer los flujos en los enlaces internacionales durante todos los periodos de programación.

El modelo, a partir de una mejora que se le hizo, puede establecer la cantidad de energía que transita por los enlaces eléctricos, sin sobrepasar su capacidad nominal.

Latinoamérica y el Caribe ha encaminado sus iniciativas políticas hacia la integración regional, sin obtener resultados significativos; no obstante, con la implementación de este modelo de mercado eléctrico regional es posible apoyar y fortalecer su integración como región, y más específicamente en materia de energía.

Si bien las FER no convencionales presentan intermitencia y no garantizan un suministro constante, son favorecidas en el marco de la integración regional puesto que la generación solar que existe en Chile, una de las regiones más apartadas de Latinoamérica y el Caribe, se puede aprovechar en Colombia, que se encuentra en la otra costa del continente.

Por último, los agentes generadores pueden ofertar sus excedentes de energía en el modelo de mercado eléctrico regional desarrollado y así alcanzar con regularidad su capacidad nominal de generación.

Por otra parte, los comercializadores se pueden ver favorecidos con los precios fijados por el mercado, ya que pueden hacerse con bloques de energía más económicos que los de su propia región o país. Es posible conocer el rendimiento de este modelo en toda la región de Latinoamérica y el Caribe, considerando todos los países de la región.

El trabajo desarrollado solamente abarca parte de la región, pero se esperaría que el desarrollo para Latinoamérica y el Caribe en su totalidad mostrara ventajas significativas y estableciera un horizonte de expansión concreto para la región, además de comparar los resultados obtenidos del modelo desarrollado, en contraste con los mercados eléctricos regionales existentes —como el MER— e incluso ver el rendimiento de mercados bilaterales, como Colombia-Ecuador, en mercados regionales.

Igualmente, se puede considerar la demanda local de cada país para verificar el comportamiento del modelo matemático desarrollado.

Sobre el modelo de optimización elaborado, es posible desarrollar una actualización que permita calcular la remuneración para el uso de los enlaces internacionales, por medio de la modificación de la restricción ecuación 8.

Por esto se requiere agregar la resta de la multiplicación entre la cantidad de energía que transita a través del enlace en MWh y el precio del peaje por el uso de la red de transmisión en \$/MWh, verificando la necesidad de restricciones adicionales.

Se sugiere presentar los valores en bloque, para los peajes internacionales, al igual que considerar el acoplamiento de sistemas de transmisión eléctrica con diferentes niveles de frecuencia, para que, en la práctica, la integración regional de Latinoamérica y el Caribe sea posible.

REFERENCIAS

- Acero, F., y Ríos, M. (2021). Planning a HVDC South American Pacific Electric Interconnection Based on MTDC. *IEEE Latin America Transactions*, 19, 1357-1365. DOI 10.1109/TLA.2021.9475866.
- Barroso, L., Muñoz, F., Bezerra, B., Rudnick, H., y Cunha, G. (2021). Zero-Marginal-Cost Electricity Market Designs: Lessons Learned from Hydro Systems in Latin America Might Be Applicable for Decarbonization. *IEEE Power and Energy Magazine*, 19, 64-73. doi: 10.1109/MPE.2020.3033398. (Journal)
- Celada, C., y Pozuelos, J. (2024). *Estimación del impacto económico en la operación del sistema eléctrico regional debido a la integración de baterías en proyectos de generación solar* [tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- DeLima, T., Franco, J., Lezama, F., y Soares, J. (2022). A Specialized Long-Term Distribution System Expansion Planning Method with the Integration of Distributed Energy Resources. *IEEE Access*, 10, 19133-19148, 2022. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3146799.
- Dias, J., y Guimarães, K. (2024). *Integração elétrica Latino-americana: uma análise comparativa entre a experiência dos blocos Comunidade Andina e o Mercosul*. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Socioeconomico, Relações Internacionais.
- Farrokhhabadi, M., Browell, J., Wang, Y., Makonin, S., Su, W., y Zareipour, H. (2022). Day-Ahead Electricity Demand Forecasting Competition: Post-Covid Paradigm. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 9, 185-191, 2022. DOI 10.1109/OAJPE.2022.3161101.
- Fernanda, M., y Colombo, A. (2020). *Reglamento del Fondo para la Convergencia Estructural del Mercosur*. Secretaría del Mercosur.
- Garnero, P., Trombetta, M., y Merino, M. (2024). *América Latina en conexión: apoyo récord a la integración*. Banco Interamericano de Desarrollo-Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe (Intal) (Technical report).
- Global Petrol Price (2024). *Electricity Price Around the World* (online). <https://www.globalpetrolprices.com> (URL).
- Guamán, W., Pesántez, G., Torres, M., Falcones, S., y Urquiza, J. (2023). Optimal Dynamic Reactive Power Compensation in Power Systems: Case Study of Ecuador-Perú Interconnection. *Electric Power Systems Research*, 218. DOI 10.1016/j.epsr.2023.109191.
- Gutiérrez, G. (2024). *Gaceta Oficial del Acuerdo de Cartagena*, N° 5482. Secretaría General de la Comunidad Andina.
- Jara, F., Luyo, J., y Meza, J. (2021). Expansión a largo plazo de la capacidad de generación: caso del mercado acoplado Perú-Chile. *Revista ECIPerú*, 18. DOI 10.33017/RevECIPeru2021.0011/. (Journal)
- López, G., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Odai, T., Ghorbani, N., Caldera, U., Prada, A., Kissel, J., y Breyer, C. (2021). Pathway to a Fully Sustainable Energy System for Bolivia Across Power, Heat, and Transport Sectors by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 293. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126195.
- Mehdi, M., Taghi, M., Reza, M., Bashooki, E., Ameli, H., y Strbac, G. (2024). Day-Ahead Coordination for Flexibility Enhancement in Hydrogen-Based Energy Hubs in Presence of EVs, Storages, and Integrated Demand Response. *IEEE Access*, 12, 58395-58405. DOI 10.1109/ACCESS.2024.3391417.
- Michaelis, A., Hanny, L., Körner, M., Strüker, J., y Weibelzahl, M. (2024). Consumer-centric Electricity Markets: Six Design Principles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191. DOI 10.1016/j.rser.2023.113817.
- Newlun, C., McCalley, J., Amitava, R., Jahanbani, A., Venkatraman, A., y Figueroa, A. (2021). *Adaptive Expansion Planning Framework for MISO Transmission Planning Process*. IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC). DOI 10.1109/KPEC51835.2021.9446221. (Journal)
- Pérez, Y., y Marulanda, G. (2016). *Impacto de un programa de respuesta de la demanda en los costos de la expansión del sistema de transmisión de energía eléctrica* [bachelor tesis, Universidad de La Salle].

- Quintero, F., Viana, P., Giraldo, D., Arboleda, B., Villegas, D., y Sánchez, M. (2020). *Hardware in the Loop Design and Testing of a PMU-Based Special Protection Scheme: Case Study of Colombia-Ecuador Interconnection*. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA). DOI 10.1109/TDLA47668.2020.9326098.
- Ruiz, C., y Balestro, M. (2024). *The Conundrums of the Green Transition in Latin America*. Preprints. DOI 10.20944/preprints202406.1238.v1.
- Sánchez, A., y Madeleine, G. (2018). *Maximal Daily Social Welfare Through Demand Side Management in the Day-Ahead Electricity Market*. IEEE International Conference on the European Energy Market (EEM). DOI 10.1109/EEM.2018.8469920.
- Sandovalin, K., y Arcos, H. (2024). *Simulador del Mercado Andino Eléctrico Regional de Corto Plazo (MAERCP). Despacho coordinado del MAERCP y determinación de precios para liquidación comercial* [bachelor thesis, Escuela Politécnica Nacional].
- Silverman, A., Wendling, Z., Rizal, K., y Samant, D. (2024). *Outlook for Pending Generation in the PJM Interconnection Queue*. Center on Global Energy Policy at Columbia School the International and Public Affairs (SIPA).
- Simoes, T. (2024). Mercosur: Challenges and Opportunities in the Regional and Global Order. *Political Science and Public Administration*, 15, 55-78.
- Undurraga, J., Rivera, M., Cossutta, P., Garcés, A., Ayala, M., García, L., y Wheeler, P. (2024). Electricity Generation under the Climate Change Situation in Latin America: Trends and Challenges. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14, 535-545. DOI 10.32479/ijeeep.15226.
- Yinya, Z., Xia, Z., Huihong, Y., Yang, Y., Ze, Y., y Kejie, Z. (2024). Key Market Mechanisms for Cross-Regional Tradings in the Electricity Market: Insights from Theory and Real-World Implementations. *IEEE Access*, 12, 97309-97331. DOI 10.1109/ACCESS.2024.3428310.

Análisis de factibilidad para implementar soluciones de autogeneración en usuarios no regulados en Colombia

Feasibility analysis to implement self-generation solutions in non-regulated users in Colombia

CRISTIAN LEONARDO MANRIQUE PÉREZ¹ - JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN² - JOSIMAR DADI TELLO MAITA³

1. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Master of Science Renewable Energy and Environment. University Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1551-2554>.
3. Master Scientiarum en Matemática Aplicada. Ing. Eléctrica. Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6895-794X>.

cristian.manrique-p@mail.escuelaing.edu.co - javier.ruiz@escuelaing.edu.co - josimar.tello@escuelaing.edu.co

Recibido: 31/08/2025 Aceptado: 01/10/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo técnico-financiero para evaluar la factibilidad de implementar soluciones de autogeneración solar fotovoltaica en usuarios no regulados (UNR) en Colombia, fundamentado en la regulación vigente y las condiciones del mercado energético nacional. Se analizan los riesgos, motivadores y aspectos técnicos de la generación solar, así como las alternativas contractuales disponibles: contrato EPC (Engineering, Procurement, and Construction) y acuerdo PPA (Power Purchase Agreement). El modelo utiliza la metodología de Project Finance para evaluar diferentes escenarios, supuestos y sensibilidades a lo largo de un horizonte de 25 años, integrando información primaria y secundaria, y considerando aspectos normativos, técnicos y financieros. Se incluyen análisis detallados del balance energético, costos de inversión (CAPEX), costos operativos (OPEX), ingresos esperados, y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados permiten a los UNR seleccionar la opción más adecuada para su contexto, alineando sus objetivos de crecimiento, sostenibilidad energética y apetito de riesgo. Un caso de estudio aplicado a una trilladora de café en Chinchiná, Caldas, demuestra la viabilidad técnica y financiera del proyecto, mostrando que la alternativa EPC ofrece mayores ahorros porcentuales y rentabilidad, aunque con una inversión inicial más alta, mientras que el PPA presenta un retorno más rápido pero con menor ahorro. Además, se comparan los resultados con datos globales de IRENA, validando la

consistencia y competitividad del modelo. Finalmente, se destaca la importancia de un marco normativo robusto y favorable para promover la democratización y descentralización de la generación eléctrica en Colombia, facilitando la transición energética hacia fuentes renovables no convencionales.

Palabras claves: autogeneración solar fotovoltaica, usuarios no regulados, modelo técnico-financiero, transición energética.

Abstract

This article introduces a comprehensive technical-financial model designed to assess the feasibility of implementing photovoltaic self-generation solutions for non-regulated users (NRU) in Colombia, based on current regulations and national energy market conditions. The study examines the risks, incentives, and technical aspects of solar photovoltaic generation, alongside contractual alternatives: Engineering, Procurement, and Construction (EPC) contracts and Power Purchase Agreements (PPA). Employing the Project Finance methodology, the model evaluates various scenarios, assumptions, and sensitivities over a 25-year period, integrating primary and secondary data, and considering regulatory, technical, and financial factors. Detailed analyses include energy balance, capital expenditures (CAPEX), operational expenditures (OPEX), expected revenues, and greenhouse gas emission reductions. The model outputs provide key decision-making indicators, enabling NRUs to select the most suitable option aligned with their

strategic growth, energy sustainability policies, and risk appetite. A case study involving a coffee milling facility in Chinchiná, Caldas, illustrates the technical and financial viability of the project, revealing that the EPC alternative yields higher percentage savings and profitability, albeit with a higher initial investment, while the PPA offers quicker returns but lower savings. Furthermore, the results are benchmarked against global data from the International Renewable Energy Agency (IRENA), confirming the model's consistency and competitiveness. The study highlights the significance of a robust and favorable regulatory framework to promote the democratization and decentralization of electricity generation in Colombia, supporting the country's energy transition towards non-conventional renewable energy sources.

Keywords: solar photovoltaic self-generation, non-regulated users, techno-economic model, energy transition.

1. INTRODUCCIÓN

La autogeneración es la actividad desarrollada por usuarios del mercado minorista de energía (Mercado Regulado y Mercado no Regulado), que producen energía, principalmente para atender sus propias necesidades, conectados a los activos eléctricos de su propiedad una generación o cogeneración de energía, debajo del medidor o frontera comercial (punto de conexión), es decir, sin usar activos de uso del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para la conexión de la generación, permitiendo la exportación de energía al SIN y la comercialización o transacción de la misma por medio de la frontera comercial de salida, en el mercado. Los autogeneradores pueden ser o no ser propietarios de los activos de generación o cogeneración, para realizar la actividad de autogeneración en Colombia (Resolución CREG 174 de 2021, 2021).

Los autogeneradores en Colombia deben ser representados ante el mercado por agentes comercializadores y/o generadores legalmente constituidos en el mercado de energía mayoristas, para el consumo (demanda) y la exportación de energía (excedentes), sin que se requiera que estos se constituyan como un agente del mercado y sin constituirse como una empresa de servicios públicos domiciliarios (Resolución CREG 080 de 2019, 2019; Resolución CREG 135 de 2021, 2021). Además, los autogeneradores cuya capacidad instalada nominal supere 1 MW, están obligados a conservar la simetría del mercado con la generación conectada en el SIN, es decir, cumplir con las reglas de mercado y los requerimientos de la regulación vigente para actividad de generación (Resolución CREG 024 de 2015, 2015).

La capacidad instalada de soluciones de autogeneración reportadas en Colombia por los agentes del

mercado a XM (Administrador del Mercado Mayorista de energía), de acuerdo con la establecido en la Resolución CREG 174 de 2021, con fecha de corte al 30 de abril de 2023, es de 117,21 MW, sin incluir los autogeneradores con capacidad declarada mayor a 5 MW conectados al SIN; esta capacidad está dividida en: 90,95 MW de solar fotovoltaica, 25,24 MW de Biomasa, 1 MW de combustibles fósiles y 0,02 MW de hidráulica, como se muestra en la Figura 1. Esto representa una penetración estimada de 0,66\% siendo un porcentaje que no representa un impacto significativo para la operación y flexibilidad del SIN, respecto a la capacidad total de generación del país que es de 17.773,03 MW al 30 de abril de 2023.

Se estima que aproximadamente el 32,7% de la demanda comercial nacional en Colombia (año 2022, XM) corresponde al mercado no regulado al cual pertenecen los UNR (XM S.A., 2023b), estos están segmentados por los diferentes sectores productivos de la economía de país, en donde el sector industrial es el mayor consumidor de energía eléctrica; de acuerdo con el perfil de demanda horario anual de los UNR (Figura 2). Del perfil horario se puede concluir que actualmente es posible implementar soluciones de autogeneración, con una capacidad instalada de aproximadamente 3 GW nominales o más, para atender parte de los requerimientos energéticos de los UNR y generar excedentes de energía para transar o comercializar en el mercado, optimizando el uso de los activos del SIN, democratizando y descentralizando la generación en el país.

Uno de los factores o habilitadores más importantes para la implementación de generación renovable en sitio para atender demanda y atender pérdidas de transporte de energía en el SIN, es el incremento en los precios del mercado y la volatilidad del precio de bolsa por la alta dependencia hidráulica de la matriz energética (ver Figura 3), que representan un incremento promedio anual de 3,5\% en la componente de generación (de la tarifa del servicio de energía eléctrica. El peso estimado de esta componente en la tarifa es alrededor del 55\% ($\pm 10\%$), lo que ha significado un incremento promedio anual estimado de 2\% en la tarifa. El valor promedio de contratos del Mercado No Regulado (MNR) para abril de 2023 es de 303,03 COP/kWh, la cual refleja el precio colocado por la oferta y la demanda para este mercado. Este valor incluye UNR grandes, medianos y pequeños.

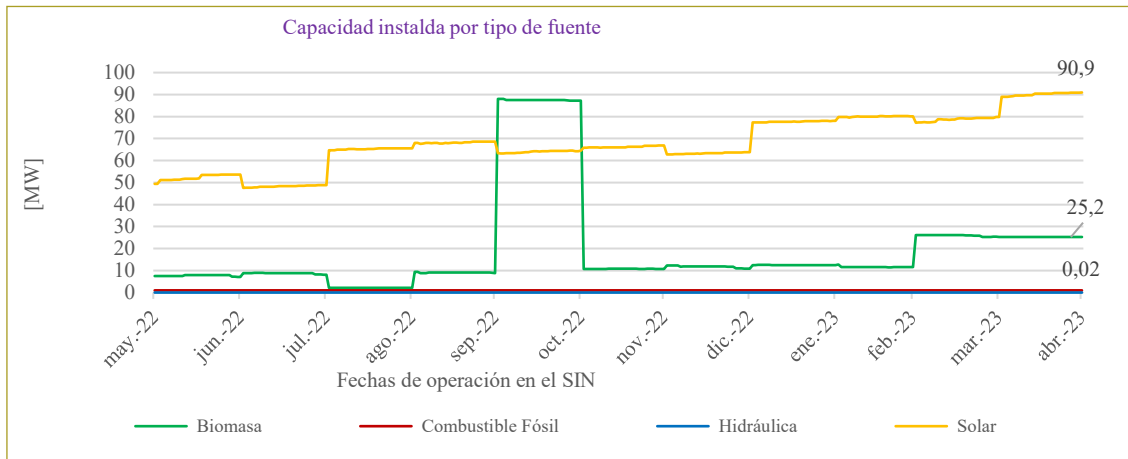


Figura 1.
Reporte de capacidad instalada de Autogeneración en Colombia.

Fuente: (XM S.A., 2023a).

Este artículo presenta un análisis integral de la factibilidad técnica y financiera para la implementación de soluciones de autogeneración solar fotovoltaica en usuarios no regulados en Colombia, considerando el marco normativo vigente, las condiciones del mercado energético y los riesgos asociados. A través de un modelo basado en la metodología de Project Finance, se evalúan diferentes escenarios y alternativas contractuales, proporcionando a los usuarios herramientas sólidas para la toma de decisiones estratégicas que contribuyan a la sostenibilidad energética, la reducción de costos y la descarbonización de la matriz energética nacional. De esta manera, se busca fomentar la democratización y descentralización de la generación eléctrica, alineando los intereses económicos y ambientales de los usuarios con las políticas públicas del país.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se analizan críticamente los estudios previos relacionados con la tarifa del servicio eléctrico, las alternativas tecnológicas y contractuales para la autogeneración, así como el marco normativo vigente que regula esta actividad. Además, se examinan los riesgos y motivadores que influyen en la adopción de soluciones de generación solar fotovoltaica, integrando aspectos técnicos, financieros y regulatorios. Esta revisión permite contextualizar el modelo técnico-financiero desarrollado, evidenciando la pertinencia y originalidad del enfoque propuesto para facilitar la toma de decisiones estratégicas en el sector energético colombiano.

2.1. Tarifa de servicio eléctrico en Colombia

La tarifa del servicio de energía eléctrica en Colombia, establecida por la Comisión de Regulación de Energía

Figura 2. Perfil de demanda horaria comercial UNR

Fuente: (XM S.A., 2023b)

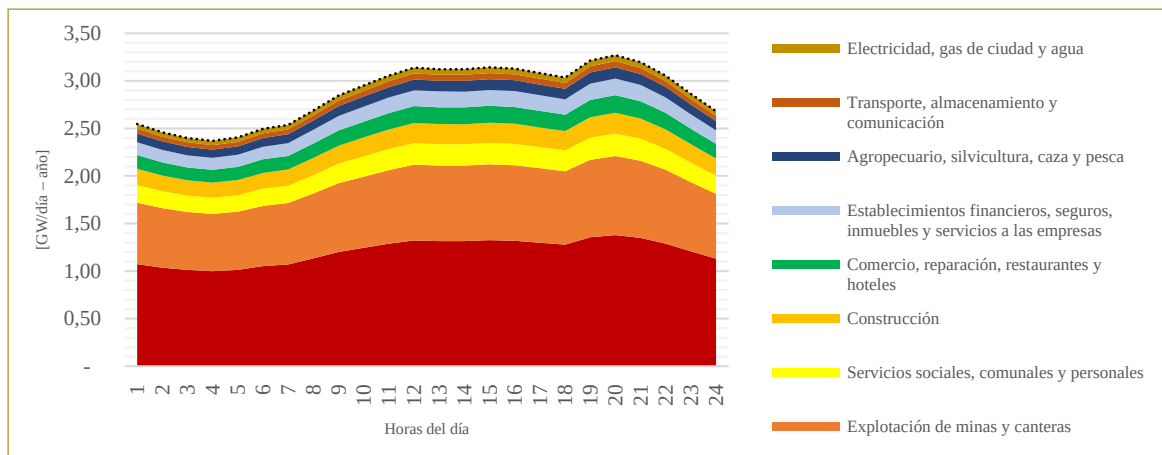
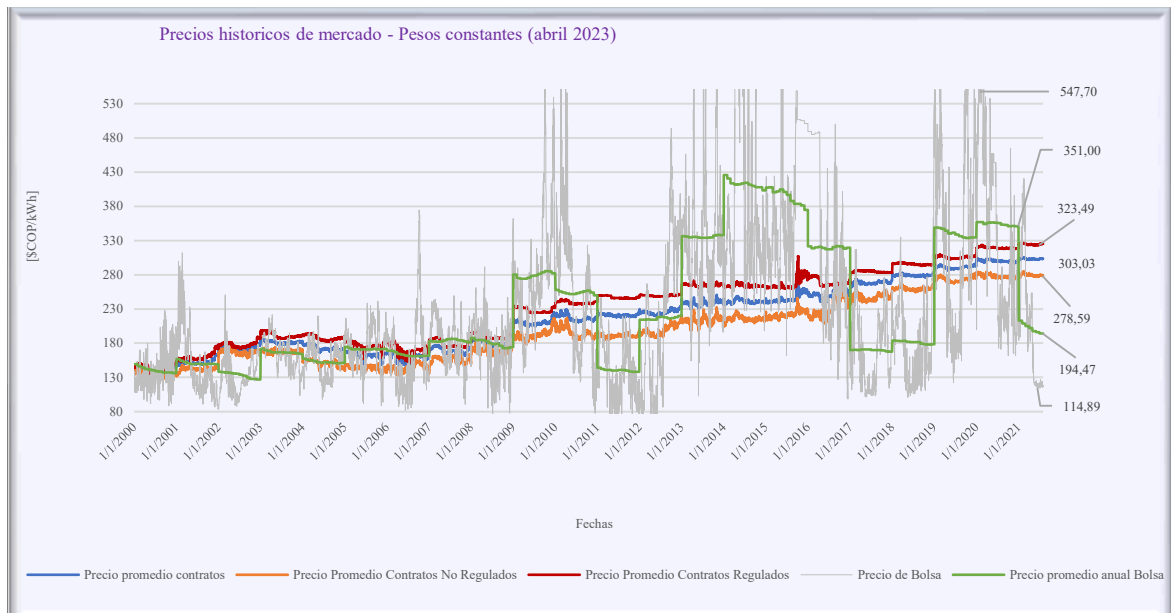


Figura 3.
Formación de
precios del
mercado.
Fuente: (XM S.A.,
2023c).



y Gas (Resolución CREG 119 de 2007, 2007), está constituida por 6 componentes, como se muestra a continuación:

$$Cu_{n,m,i,j} = G_{m,i,j} + Cv_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i} \quad (1)$$

(COP/kWh)

donde n es el nivel de tensión de conexión del usuario, m es el mes para el cual se calcula el Costo Unitario de Prestación del Servicio, i es el Comercializador Minorista, j es el Mercado de Comercialización, $G_{m,i,j}$ es el costo de compra de energía o costo de generación en COP/kWh, $Cv_{m,i,j}$ es el margen de comercialización en COP/kWh, T_m es el costo por uso del Sistema de Transmisión Nacional (STN), $D_{n,m}$ es el costo por uso de Sistemas de Distribución, $PR_{n,m,i,j}$ es el costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía, $R_{m,i}$ es el costo de restricciones y de servicios asociados con la generación.

Los dos primeros representan los costos de generación y los costos de comercialización que son pactados entre los agentes y los UNR, suponen un peso alrededor del 60\% ($\pm 5\%$) en la tarifa, es decir, estas dos componentes representan un incremento promedio anual estimado de 2,5\% en la tarifa. Las otras cuatro componentes son costos asociados al uso y a las restricciones del SIN, por lo tanto, son componentes reguladas para los UNR, estas tienen un peso estimado del 40\% ($\pm 10\%$). En la tarifa de los UNR, estas componentes son calculadas con base en las resolucio-

nes correspondientes de la CREG, bajo los principios de las leyes 142 y 143 de 1994 (Resolución CREG 011 de 2009, 2009; Resolución CREG 062 de 2000, 2000; Resolución CREG 119 de 2007, 2007).

Por lo anterior, los precios del servicio de energía eléctrica no solamente dependen de las variables del mercado (oferta, demanda, precio de combustibles, volúmenes y aportes, nuevos proyectos de generación, entre otros), sino de las metodologías y formulas regulatorias establecidas por la CREG, en donde esta entidad considera las condiciones macroeconómicas del país (incremento en el IPP, IPC, entre otras variables), las restricciones operativas del parque de generación y sus servicios complementarios que le prestan al SIN, las pérdidas técnicas y no técnicas, las inversiones que ejecutan los Distribuidores y los Transmisores en el SIN; para el cálculo de las tarifas o costos asociados al servicio de energía eléctrica.

El incremento en las componentes reguladas es causado principalmente por los incrementos en el IPP, que es el factor indexador de las inversiones remuneradas en el cargo de distribución reconocidos a los Operadores de Red (OR), obligados a cumplir con el aseguramiento de la calidad y la seguridad del servicio de energía eléctrica en el país, lo cual actualmente está siendo replanteado por el regulador. En los últimos 5 años el IPP ha tenido un incremento promedio anual de 8,5\%. Lo que ha significado un incremento promedio anual estimado de 3,4\% en la tarifa en los últimos 5

años. Por consiguiente, la tarifa para los UNR en Colombia ha tenido un incremento promedio anual estimado en los últimos 5 años del 6\% ($\pm 2\%$), considerando los incrementos por las condiciones del mercado de energía mayorista y los incrementos por los principios económicos para establecer los costos del servicio de energía eléctrica en el país (Vélez, 2022).

El implementar soluciones energéticas (autogeneración, eficiencia energética, calidad de la energía, respuesta de la demanda, entre otras), puede representar a los UNR, mejorar sus ingresos de su actividad productiva y/o reducir la dependencia del SIN, al gestionar sus consumos y/o al generar energía en sitio más económica que la energía tomada de la red, que se factura al Costo Unitarios de Prestación del Servicio (Cu(n,m,i,j)). Obteniendo como resultado un costo promedio ponderado menor y generando ahorros por el autoconsumo de energía e ingresos por la venta de excedentes de energía, transada en el mercado.

2.2. Alternativas para Autogeneración

Las alternativas para implementar soluciones de autogeneración ya sea solar fotovoltaico u otro tipo de fuente de energía renovable no convencional en sitio, son:

- Contrato EPC: invertir en activos de generación, contratando la ingeniería, el suministro, la construcción y la puesta en operación comercial. Adicionalmente manteniendo y operando estos activos durante su vida útil.
- Acuerdo de compraventa de energía PPA: contrato bilateral de compra de energía bajo condiciones de mercado, pactado libremente, cuya energía proviene de unos activos de generación de propiedad de un tercero (agente del mercado).

Lo anterior es posible, teniendo en cuenta que el autogenerador de energía puede o no ser propietario de los activos de generación, que se conectan a los activos eléctricos aguas abajo de la frontera comercial, sin utilizar los activos del SIN.

La toma de decisiones en UNR para implementar soluciones de autogeneración involucra múltiples factores clave. En primer lugar, el análisis financiero es fundamental para evaluar qué inversión genera mayor valor económico para los accionistas, lo cual se logra

mediante un modelamiento financiero riguroso. En paralelo, el análisis técnico requiere del conocimiento especializado para dimensionar adecuadamente la tecnología y sus beneficios, un recurso que generalmente no está disponible internamente en los UNR. Además, los requerimientos normativos vigentes ofrecen un marco claro y abierto que facilita la implementación de estas soluciones energéticas.

La gestión de riesgos también juega un papel importante, ya que la disposición a asumir o transferir riesgos depende del apetito y la estrategia del UNR para maximizar beneficios económicos. La capacidad de endeudamiento, evaluada a través de indicadores financieros, determina la viabilidad de optar por un contrato EPC o un acuerdo PPA. La planeación estratégica del negocio, liderada por la gerencia o junta directiva, es crucial para alinear la autogeneración con los objetivos de crecimiento, optimización y diversificación del negocio. Finalmente, las políticas de sostenibilidad y el entorno empresarial influyen en la decisión, promoviendo la reducción de la huella de carbono, la eficiencia energética y la competitividad frente a referentes locales o internacionales que ya han adoptado estas tecnologías, incentivando así a los UNR a adoptar soluciones a la medida de sus necesidades mediante contratos EPC o PPA.

2.3. Marco normativo

En Colombia hay hechos concretos en la política pública y el marco normativo, que impulsan la incorporación de manera eficiente, segura y confiable los sistemas de energía renovables no convencionales para el desarrollo de la actividad de autogeneración (Figura 4) lo que representa un gran paso hacia la transición energética, la complementariedad, la seguridad energética, la descentralización y la descarbonización de la matriz energética del país.

A partir de la publicación de las resoluciones CREG 024 de 2015 y CREG 030 de 2018, esta última sustituida por la Resolución CREG 174 de 2021, promovidas por la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, y aquellas que las modifiquen, complementen, adicionen o sustituyan (normativa vigente). En Colombia se regula la actividad de autogeneración, estableciendo las condiciones o reglas generales de conexión, el cumplimiento técnico-regulatorio, la puesta en operación,

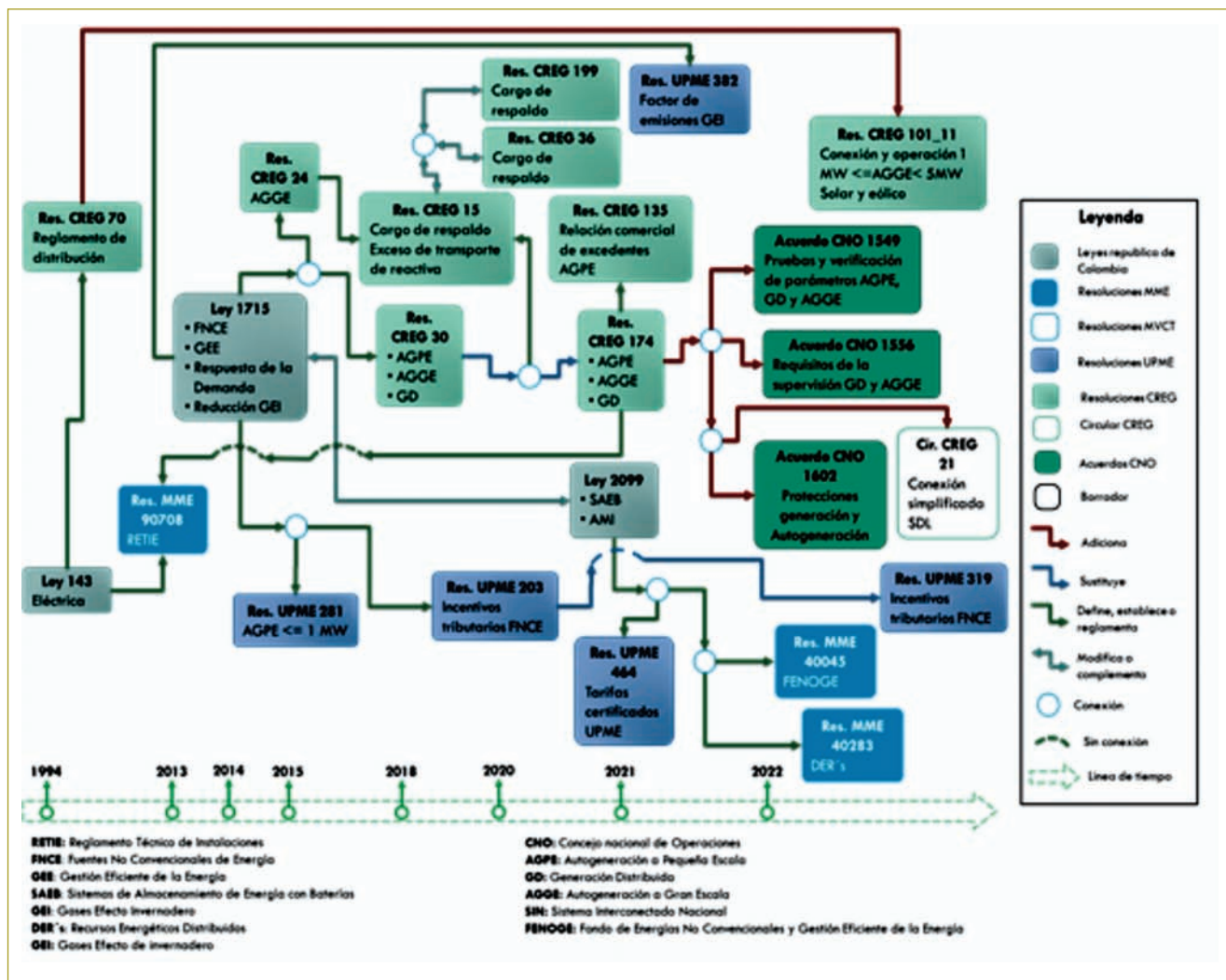


Figura 4. Marco normativo de la actividad de autogeneración en Colombia.

Fuente: Elaboración propia a partir de las resoluciones y acuerdos de la CREG.

la operación, el respaldo de red y la comercialización de energía, producto de su incorporación al SIN. En donde se establece la posibilidad de entregar excedentes al SIN y la transacción de energía en el mercado, para atender demanda de los mercados regulados y no regulados, por parte de un comercializador y/o generador legalmente constituido en el Mercado de Energía Mayorista (MEM), bajo una representación pactada entre el agente y el usuario.

Colombia hoy cuenta con una regulación vigente de la actividad de autogeneración lo suficientemente robusta y que brinda garantías, para que los UNR, implementen soluciones de autogeneración. Existen barreras, pero estas han sido identificadas y la CREG está trabajando para eliminarlas, siempre y cuando se

garanticen condiciones técnicas y de mercado que no estén en contravía de los principios de las leyes 142 y 143 de 1994.

2.4. Riesgos de la Autogeneración

A continuación, se presentan de manera general los principales riesgos identificados de la actividad de autogeneración, los cuales pueden causar imprevistos o sobrecostos, sino se controlan, mitigan o se eliminan en la planeación y ejecución. Estos pueden afectar el retorno de la inversión de los activos de generación. Los cuales son contemplados en el modelo, bajo inputs, escenarios y supuestos.

- a. *Obsolescencia tecnológica*: Los paneles solares representan aproximadamente entre el 30 % al 60 % de la inversión de los activos de generación, siendo una tecnología emergente con baja eficiencia (alrededor del 22 %, tipo N), pierden rápidamente vigencia, lo que implica que no es factible comprar grandes volúmenes para almacenar y posteriormente instalar. Por consiguiente, hay que considerar tiempos de fabricación, transporte internacional, importación y transporte a sitio. Lo que implica garantías, pólizas y servicios postventa.
- b. *Cambios normativos y regulatorios*: La regulación vigente está sujeta a cambios, por lo general debido a: fallas de mercado, por vigencias, cambios de gobierno, por exigencias técnicas SIN (acuerdos CNO – Consejo Nacional de Operación), por cambios en el código de redes o en las reglas del mercado. Esto implica una participación, con los gremios, academia y agentes del sector, para favorecer el desarrollo de la actividad de autogeneración en el país.
- c. *Barreras técnico-regulatorias*: El regulador (CREG) junto con el ministerio de energía (MME), han venido avanzando en resolver estas barreras de entrada, pero hoy se identifican tres: el cargo de respaldo de red, el cargo de exceso de energía reactiva y la posición dominante. Las dos primeras están bajo propuestas regulatorias y la tercera se ha dado claras señales por medio de las Resoluciones CREG 80 de 2019, 135 de 2021 y 174 de 2021.
- d. *Oferta de autogeneración*: Promotores que ofrecen en el mercado servicios y promesas de valor, para el desarrollo de soluciones de autogeneración en Colombia, pero no cuentan con la experiencia, los conocimientos técnicos y la ingeniería, para la implementación de soluciones energéticas, e igualmente desconocen la normativa y regulación vigente, ofertando retornos de inversión o ahorros sin un conocimiento normativo, técnico y financiero idóneo.
- e. *Penetración masiva en los Sistemas de Distribución Local (SLD)*: los SDL son los activos del SIN, con tensiones menores a 57 kV, siendo los niveles de distribución de energía que suministran energía a algunos UNR y a todos los UR, si se implementan soluciones de generación en estos usuarios a un nivel que desborde la capacidad de estos sistemas, se podrían presentar los siguientes retos técnicos: incremento en la corriente de cortocircuito, variación en los niveles de tensión, coordinación de protecciones bidireccionales y diferenciales, entre otros (Seguin et al., 2016). Lo que puede causar cambios regulatorios, incremento en las pérdidas del SIN y exigencias de entrada más restrictivas.
- f. *Fallas eléctricas y daños a terceros*: posibles daños en la integridad física y material en la ejecución, operación o mantenimiento de los sistemas de autogeneración por fallas eléctricas y/o errores humanos, lo que implica el aseguramiento de los activos de generación por medio de pólizas o garantías.
- g. *Riesgo de crédito – PPA*: incumplimiento del acuerdo PPA por parte del UNR, por insuficiencia financiera, terminación anticipada, entre otros. Esto principalmente se debe a dos condiciones: abuso de poder de mercado o insuficiencia financiera del usuario, el primero es debido a un mal asesoramiento al cerrar acuerdos PPA y el segundo es el resultado de no realizar un análisis de estados financieros del UNR para validar su salud financiera. Los UNR deben tener claro que un PPA de un proyecto de autogeneración es un acuerdo de ahorros compartidos y que ambas partes deben plantear un negocio en donde ambos ganen.
- h. *Desconexión del sistema de generación y de la desconexión de la demanda*: hay dos principales razones por las cuales el OR está obligado a desconectar los activos de generación y la demanda del UNR: primera, por modificaciones en las características técnicas de los activos de generación no declaradas en la solicitud de conexión o por no surtir una nueva solicitud al ampliar o modificar; segunda, por no realizar la solicitud de conexión de los activos de generación para desarrollar la actividad de autogeneración ante el OR. Lamentablemente el no cumplimiento de requerimientos técnicos exigidos (certificación RETIE, entre otros requerimientos) ha sido una práctica que promotores no calificados realizan para vender y facturar, al ejecutar contratos EPC en Colombia.
- i. *Seguridad física*: por hurto o daño en los activos de generación, se requieren sistemas de vigilancia remota (CCTV), vigilancia permanente, cerramientos y pólizas o garantías. Dependiendo de las condiciones sociales o delincuencia en donde se instalen los activos de generación. Lo que implica incrementos en el OPEX (costos de operación) o CAPEX (costos de inversión o sostenimiento) del proyecto.

- j. *Barreras en la conexión del proyecto*: la información suministrada por el OR, para realizar los estudios de conexión simplificada, en algunos casos no ha sido veras, confiable, oportuna y de calidad, lo que ha obligado a que la UPME sea un medio por el cual se entregue esta información, por medio de la creación de la VU (Ventanilla Única), la cual está en proceso de creación para las solicitudes de conexión de autogeneración al SIN. Sin embargo, hay OR que no están preparados para este requerimiento normativo, lo que implica retrocesos y tiempos para la implementación de soluciones de autogeneración.
- k. *Incremento en el valor del suministro*: teniendo en cuenta que los activos de generación son bienes que deben ser importados y representan desde el 30 % al 60 % de la inversión (generación solar fotovoltaica), se pueden generar sobrecostos por: el incremento en la TRM (Tasa Representativa del Mercado, COP/USD), el incremento en la logística nacional o internacional, el incremento en la materia prima, el incremento en los tiempos de suministro o en el incremento de los trámites de nacionalización.
- l. *Producción de energía con fuentes intermitentes*: la generación solar fotovoltaica es una fuente de generación que depende de las condiciones ambientales, las cuales son impredecibles y variables. Lo que implica que si hay un día despejado la producción de energía tiene una probabilidad alta de generar la capacidad nominal instalada (100 % o hasta el 110 %), de lo contrario será una producción que puede llegar a cero si hay condiciones de lluvia, también puede llegar al 20 % de su capacidad en condiciones de nubosidad, en instantes de tiempo puede estar produciendo al 80 % y pasa una nube causando que baje al 20 % o hasta el 10 % de su capacidad nominal, depende de la densidad de las nubes. Lo cual se refleja en factores de planta muy bajos entre el 17 % al 23 %, adicionalmente por condiciones de polución y/o sombreado.
- m. *Confiabilidad de la red (SDL y STR)*: La red eléctrica colombiana está sujeta a eventos de falla, por las condiciones topológicas, atmosféricas y geográficas. Con la entrada de la Resolución CREG 015 de 2018, se están implementando refuerzos y soluciones para mejorar los indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia; los OR están invirtiendo en activos eléctricos que garantizan el mejorar la disponibilidad y confiabilidad de la red, que probablemente no garanticen un 100 % de disponibilidad por los retos que esto implica. Por tal razón es adecuado suponer la salida de la generación por fallas en el SIN.
- n. *Riesgo de bolsa*: El precio de bolsa en Colombia, es volátil (con alta incertidumbre) y altamente dependiente de la hidrología; la matriz energética aproximadamente está conformada por un 65% hídrico, 3% renovable no convencional y 32% térmico (año 2023). Lo que implica bajos precios en temporada de lluvias y altos precios en temporada seca, esto implica que, al vender excedentes a la red a precio de bolsa, puede ser beneficioso en condiciones secas o condición de niño, por lo contrario, es oportuno evaluar su colocación en contratos, en caso de generar un volumen importante de excedentes hacia la red.
- o. *Tiempos de ejecución*: los tiempos de un proyecto de autogeneración, pueden ser cortos, pero esa realidad no es tan cierta en la mayoría de casos, las siguientes condiciones amplían sustancialmente los tiempos de ejecución: logística de importación, condiciones climáticas de la zona de instalación, actividades internas del UNR, mala planeación de la ejecución, solicitud de conexión retrasada, ingeniería con bajos estándares y no cumplimiento de requerimientos técnicos (certificación RETIE, entre otras).
- p. *Riesgos eléctricos y trabajo en alturas*: condiciones inseguras que son de alto riesgo por la naturaleza del trabajo, realizando un estricto cumplimiento a los procedimientos de trabajo desenergizados, energizado y trabajo en alturas, tanto en la ejecución, como en las actividades de operación y mantenimiento. Para lo cual se debe contar con personal calificado y políticas de seguridad de obligatorio cumplimiento. Validando la capacidad portante de la estructura y la cubierta (análisis estructural).
- q. *Calidad y estabilidad de la obra*: los equipos y elementos que hacen parte integral del proyecto serán nuevos y deben cumplir la conformidad RETIE, por otro lado, el mantenimiento debe ser el adecuado, bajo las instrucciones de los manuales de fábrica para conservar las garantías del suministro. Adicionalmente que se realicen controles de calidad en fábrica (pruebas FAT), controles de calidad en sitio (pruebas SAT) y pruebas de puesta en operación (trazadoras, termografía con Drones y pruebas de aislamiento).

Todos estos riesgos son cuantificados o incluidos como entradas, supuestos y escenarios dentro del modelo, para identificar su impacto, estos riesgos deben ser conocidos por el UNR, teniendo en cuenta que su decisión de contratar un EPC o firmar un PPA, debe contemplar mitigar, eliminar, asumir o transferir el riesgo, conforme con su apetito al riesgo o estrategia de negocio.

2.5. Motivadores para la Autogeneración

En la toma de decisiones relacionadas con la implementación de soluciones de autogeneración con fuentes renovables no convencionales, como la solar fotovoltaica, los UNR consideran diversos aspectos estratégicos que incluyen la planeación del negocio, las políticas de sostenibilidad y el entorno empresarial. Los motivadores claves incluyen la reducción del impacto ambiental, como la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento del potencial energético solar, así como el deseo de alinearse con objetivos de carbono neutralidad. Asimismo, se busca fomentar la participación en el mercado energético y reducir la dependencia de la red mediante la generación propia de energía.

Otros factores incluyen beneficios económicos como la reducción de costos asociados al servicio eléctrico, el acceso a incentivos tributarios, y la protección frente a incrementos tarifarios. Desde el punto de vista técnico, las soluciones de autogeneración permiten disminuir pérdidas de energía, implementar proyectos piloto y explorar nuevas tecnologías. Además, las políticas públicas desempeñan un papel fundamental al promover la transición energética mediante normativas e incentivos como el FENOGÉ y los marcos regulatorios establecidos por entidades gubernamentales. Estos aspectos han sido incorporados como insumos y supuestos en el modelo analizado, consolidando su relevancia en el contexto de la autogeneración renovable.

Se pueden describir con más detalle algunos aspectos habilitadores que los UNR pueden tener y que les facilitan la implementación de autogeneración:

- a. *Poder adquisitivo*: por medio de socios o accionistas y su relación con la banca con la cual apalancan sus operaciones y crecimiento en su sector productivo, por supuesto de la mano de su salud financiera reportada en sus estados financieros.
- b. Grandes volúmenes de energía consumidos, un UNR para formar parte del mercado en libre competencia (Mercado No Regulado), debe consumir un volumen de energía superior a 55 MWh al mes o tener una capacidad instalada (transformación) superior a 0.1 MW.
- c. Áreas útiles disponibles: la gran mayoría de UNR, cuentan con cubiertas, terrazas, parqueaderos y/o predios en los cuales se pueden instalar activos de generación.
- d. Hacen parte del Mercado en libre competencia: ya han cerrado acuerdos de compraventa de energía con agentes comercializadores del mercado para comprar los volúmenes de energía que requieren para su operación, es decir, que conocer las condiciones generales de un acuerdo PPA comprando energía y pueden acordar plazos de 15, 20, 25 o 30 años, bajo acuerdo entre el UNR y el agente legalmente constituido (comercializador o Generador).
- e. Gastos operacionales de compra de energía altos y en incremento, los requerimientos energéticos para el desarrollo de sus actividades productivas multiplicados por la tarifa que pagan por el servicio de energía eléctrica (PxQ, cantidad por precio), es un gasto que incrementa anualmente aproximadamente entre un 3.5\% hasta un 8\% en Colombia.
- f. Incentivos tributarios: la mayoría de UNR en Colombia, contribuyen mediante el pago del IVA (Impuesto sobre el Valor Agregado) y la declaración de Renta (Impuesto sobre los ingresos), los cuales a partir de la Ley 1715 de 2014 y la ley 2099 de 2021 hasta el 2051, se convierten en mecanismos para incentivar y apalancar la inversión en FNCER.
- g. Cargas trifásicas y compensación de excesos de transporte de energía reactiva: cuentan con conexiones trifásicas con capacidades mayores a 0.1 MW, en donde se pueden implementar soluciones de calidad de la energía y/o compensaciones de energía reactiva, adicionalmente se pueden instalar equipos con capacidad de inyectar o consumir reactiva para control detención y factor de potencia en el punto de conexión, para controlar el exceso de energía reactiva penalizada de acuerdo con lo establecido en la regulación vigente
- h. Medida horaria: cuentan con equipos de telemedidas, con registros históricos horarios que permiten realizar análisis de balances energéticos, los cuales son de

gran importancia para el cálculo de los ahorros y/o ingresos esperados por el autoconsumo y la venta de excedentes de energía.

- i. Contribuciones o Aporte solidario: los UNR están sujetos a realizar pago de contribuciones sobre la base del cálculo del consumo de energía eléctrica, para subsidiar el costo del servicio de los estratos 1, 2 y 3, lo que implica en un factor favorable para aquellos que están obligados a contribuir, debido a que si el consumo disminuye por la entrada de generación que atiende parte de su consumo esta contribución que puede llegar hasta el 20% del consumo facturado, proporcionalmente con su autoconsumo se disminuirá. cuya aplicación o excepción del pago de la contribución se establece en la normativa vigente.
- j. Licencias y/o permisos ambientales, cuando se aprovechan las cubiertas, los techos y los parqueaderos, para la instalación de soluciones solares fotovoltaicas, no se requieren licencias o permisos ambientales, solo contar con planes de manejo ambiental durante la construcción para realizar disposición de escombros u residuos de obra. Lo que implica que los tiempos de ejecución se acortan considerablemente, que en consecuencia disminuye los costos financieros durante la construcción.
- k. Incremento en el impuesto predial y/o cambios en el POT municipal: cuando se aprovechan las cubiertas, los techos y los parqueaderos, no se están realizando ampliaciones en áreas construidas, por lo tanto no incrementa el impuesto predial del UNR, adicionalmente no se está realizando aprovechamiento de terrenos que cuenten con clasificación de uso no compatible con la actividad de generación de energía lo que implica no realizar trámites de licencias o tramitar la adecuación o cambio de uso de suelo para la implementación de soluciones de autogeneración en estas áreas útiles.
- l. Potencial energético solar y normativa robusta y favorable para la implementación de soluciones de autogeneración: son dos factores relevantes por la ubicación geográfica de Colombia, que cuenta con un potencial energético superior a la media mundial y la política pública ha sido encaminada hacia la transición energética (complementariedad, seguridad energética, descentralización y descarbonización de la matriz energética del país).

2. METODOLOGÍA

El modelo desarrollado se presenta a nivel general y conceptual, en la Figura 5, este fue estructurado en Microsoft Excel como una herramienta. En este modelo se pueden identificar las entradas que se agrupan en tres principales grupos: el primero, son los inputs, los supuestos y los escenarios; el segundo, es el balance de energía entre demanda y generación horaria; el tercero, es la ingeniería conceptual o básica del proyecto solar fotovoltaico.

La estructura interna del modelo está conformada por la metodología *Project Finance* (Mohamadi, 2021) el dimensionamiento de la deuda (deuda esculpida), las proyecciones del balance energético entre demanda y generación anual, el cálculo de los ingresos, costos y gastos que son la entrada para el flujo de caja o proyecciones financieras para el EPC y PPA a 25 años, ambas proyecciones vistos desde la perspectiva del UNR, las cuales se descuentan por medio de la metodología de flujos finitos, por ende, se descuentan con un Rolling WACC. Para generar a partir de este modelo las salidas de toma de decisión, las cuales se ponderan conforme los motivadores y aspectos de toma de decisión para seleccionar la mejor alternativa, que corresponden a invertir en activos de generación (contrato EPC) o comprar energía (acuerdo PPA). Todo lo anterior se cruza y se pondera con las políticas estratégicas, las políticas de sostenibilidad energética y su apetito de riesgo del UNR.

Las sensibilidades del modelo son el resultado de valorar los indicadores financieros de salida del modelo, al presentarse variaciones porcentuales entre el 0% y el 15% de la generación, la tarifa del UNR, el precio pactado del PPA, el CAPEX y el OPEX. Siendo escenarios probables que determinan la materialización de los riesgos identificados de la actividad de autogeneración presentados en la Sección 2.4. Riesgos de la Autogeneración.

El Balance de energía es uno de los principales elementos del modelo, el cual fue estructurado para responder a dos metodologías establecidas en la regulación vigente relacionada con la venta de excedente (Resolución CREG 174 de 2021, 2021), el *Net Metering* como créditos de energía o el *Net Billing* como venta de energía de los excedentes al mercado, dependiendo de estos escenarios de venta de excedentes, el balance de energía se ajusta para ambos escenarios dentro del modelo. En el balance de energía se contempla la matriz

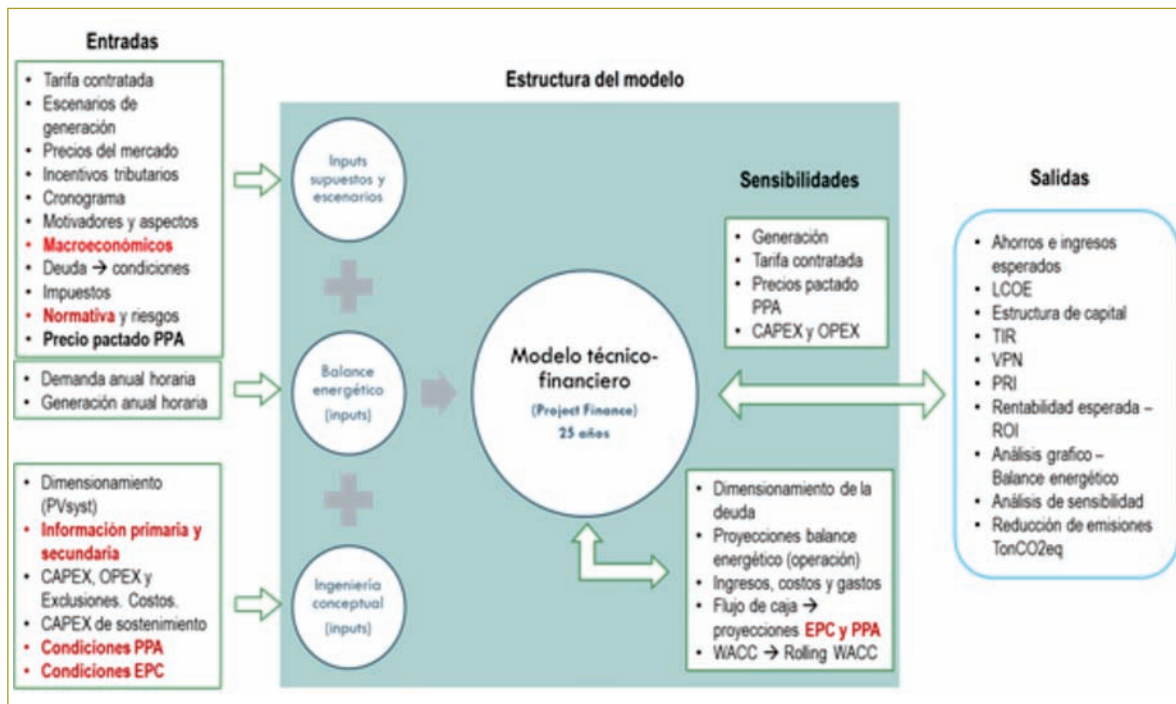


Figura 5. Estructura del modelo técnico-financiero.

Fuente: Elaboración propia.

de demanda (Figura 6) vs la matriz de generación horaria (Figura 7), cruzando los perfiles horarios proveniente de una matriz de consumos horaria real del UNR y una matriz de generación horaria sintética resultado de ingeniería conceptual utilizando software especializado como PVsyst (PVsyst SA, 2025).

En estas dos matrices se puede observar el comportamiento de la demanda y la generación, en donde podemos identificar la estacionalidad anual, la desviación anual, la volatilidad o firmeza, sus perfiles de consumo

y generación respectivamente. Que es realmente uno de los instrumentos más valiosos del modelo, ya que con este se van a realizar el cálculo de los ingresos o ahorros esperados. Adicionalmente junto con la información primaria y secundaria, los requerimientos técnicos normativos y demás aspectos de ingeniería básica, se determinan los costos inversión, los gastos y los costos de operación y mantenimiento, los cuales se proyectan en un flujo de caja, bajo la metodología *Project Finance* (Mohamadi, 2021).

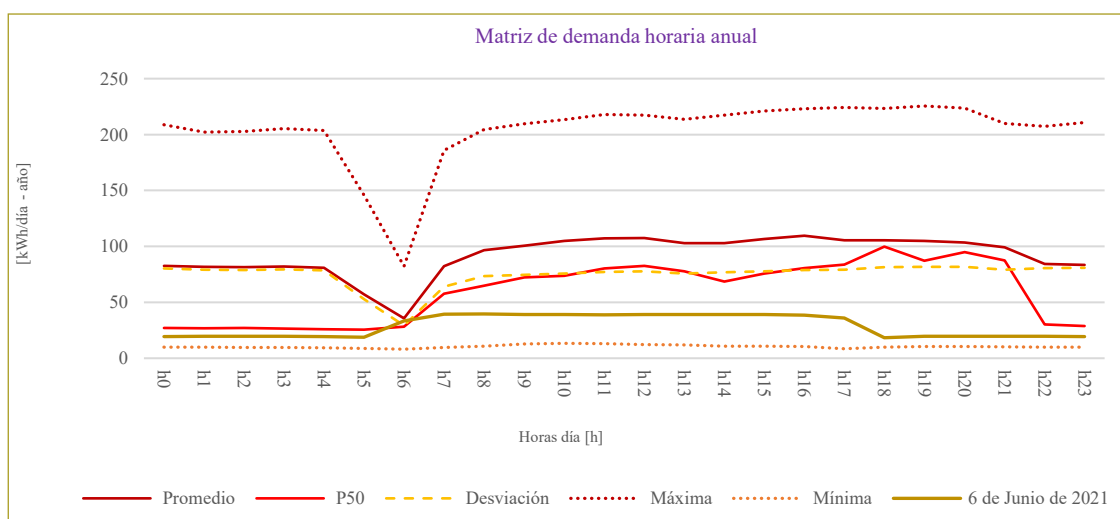


Figura 6. Matriz de demanda horaria anual, UNR – caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones.

Al cruzar la generación y demanda con este nivel de detalle, se puede llegar a un estimado probable, que incluye un nivel de detalle que es traducido en ingresos o ahorros esperados en el modelo (Figura 8). La fecha presentada (6 de junio de 2021) corresponde a la demanda que el UNR consumió desarrollando su actividad económica.

Para el cálculo de los ahorros y/o ingresos esperados se utilizan dos fórmulas establecidas en la regulación vigente. Formulas Venta de Excedentes AG – Ahorros y/o ingresos por excedentes (Resolución CREG 174 de 2021, 2021):

- a. Para proyectos mayores a 100 kW y menores a 1 MW (*Net Metering*, Créditos de energía):

$$VE_{i,j,n,m,u} = (Exc1_{i,j,m,u} - Imp_{i,j,m,u}) * CUv_{n,m,i,j} - [(Exc1_{i,j,m,u} * (Cv_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i})) + \sum_{h=h_x, h_x+1, \dots, H} Exc2_{i,j,m,u} * Pbolsa_{h,m}] \quad (2)$$

Donde n es el Nivel de tensión de conexión del usuario, m es el mes para el cual se calcula el Costo Unitario de Prestación del Servicio, i es el comercializador minorista - MNR, j es el mercado de comercialización - MNR, u es el Usuario u - MNR, $VE_{i,j,n,m,u}$ es la valoración del excedente del AG u en COP, $Exc1_{i,j,m,u}$ es el excedente de energía horaria acumulada en kWh, $Imp_{i,j,m,u}$ es la importación de energía acumulada en kWh, $CUv_{n,m,i}$ es el costo Unitario de Prestación del Servicio en COP/kWh, $Cv_{m,i,j}$ es el margen de comercialización en COP/kWh, T_m es el costo por uso del STN en \$COP/kWh, $D_{n,m}$ es el costo por uso del sistema de distribución en COP/kWh, $PR_{n,m,i,j}$ es el costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía en COP/kWh, $R_{m,i}$ es el costo de restricciones y servicios asociados con generación en COP/kWh, $Exc2_{i,j,m,u}$ es todo excedente de energía en la hora h del AGPE u , en kWh y $Pbolsa_{h,m}$ es el precio de bolsa en la hora h del mes m , en COP/kWh.

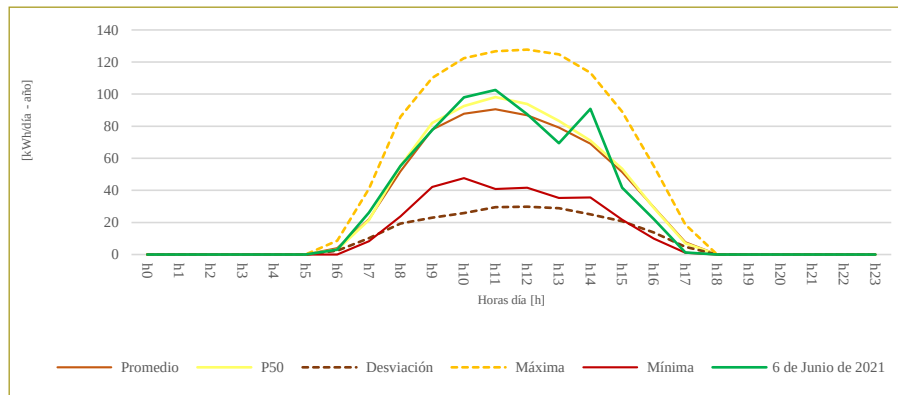
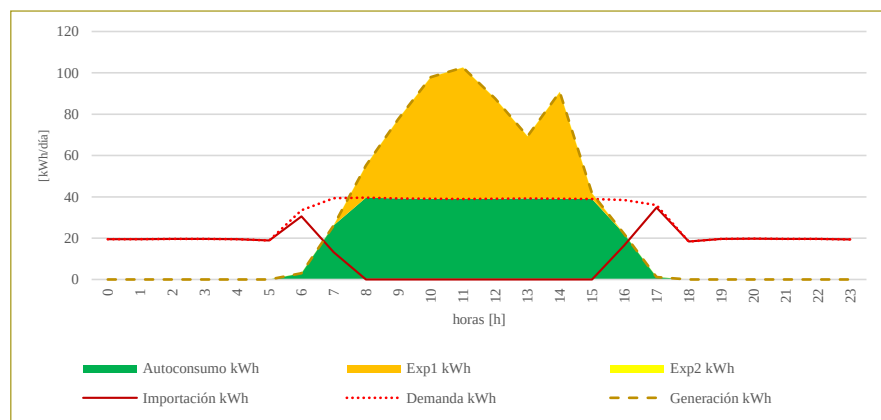


Figura 7. Matriz de generación horaria anual, PVsyst sintética – caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de PVsyst.

Figura 8. Balance de energía horario diario para el día 6 de junio de 2021 – caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones y PVsyst.



- b. Para proyectos mayores a 1 MW o precio pactado libremente (*Net Billing*, Venta de excedentes al mercado):

$$VE_{i,j,n,m,u} = \sum_{h \in m} ExcT_{h,i,j,m,u} * PP \quad (3)$$

$$ExcT_{h,i,j,m,u} = Exc1_{i,j,m,u} + Exc2_{i,j,m,u} \quad (4)$$

Donde PP es el precio de energía pactado libremente para el Autogenerador del mes m en COP/kWh. Además, los ingresos y/o ahorros esperados son el resultado de la siguiente ecuación:

$$Ing + Ahor_{i,j,n,m,u} = Dem_{i,j,m,u} * CU_{v,n,m,i,j} - VE_{i,j,n,m,u} \quad (5)$$

Donde $Dem_{i,j,m,u}$: demanda de energía acumulada en kWh y $CU_{v,n,m,i,j}$ es el costo Unitario de Prestación del Servicio en COP/kWh. Este es el resultado de la liquidación esperada con y sin proyecto de autogeneración, teniendo en cuenta que para el caso de firmar un acuerdo PPA, los estos ahorros serán divididos entre el UNR y el agente (tercero) como un modelo de negocio de ahorros compartidos (modelo ESCO).

Este tipo de proyectos tiene dos fuentes para financiar la inversión durante la etapa de construcción y puesta en operación de un proyecto, estas fuentes son el Capital o *Equity* (aporte de los socios) y la Deuda (Financiamiento). Las cuales son proporcionales a las necesidades y requerimientos de capital del proyecto, es decir, es una mezcla de fuentes debidamente calculada, entre capital y deuda que se le denomina estructura de capital, y la porción de capital y deuda cambia durante la vida útil del proyecto, es decir, que su comportamiento es dinámico.

Para calcular la estructura de capital, se utiliza la teoría de Modigliani y Miller en su proposición II, (8) y la teoría William Sharpe o modelo CAM (*Capital Asset Pricing Model*) (7), (Ross et al., 2012) de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$WACC = \frac{D}{D+E} * kd * (1 - Tx) + \left(1 - \frac{D}{D+E}\right) * k_e \quad (6)$$

$$k_u = R_f + \beta_u * (R_m - R_f) \quad (7)$$

$$k_e = k_u + (k_u - k_d) * \frac{D}{E} \quad (8)$$

Donde $WACC$ es el costo promedio ponderado del capital, k_e es el costo del capital accionario, k_u costo del capital accionario para una empresa no apalancada, k_d es el costo de capital de la deuda, D es el valor de mercado de la deuda, E es el valor de mercado del capital accionario y Tx es la tasa del impuesto sobre utilidades.

Por lo anterior, se utiliza el concepto de Rolling WACC (Krüger et al., 2015) para descontar los flujos durante más de un periodo de tiempo, teniendo en cuenta la naturaleza de la estructura de capital de este tipo de proyectos la cual es de flujos finitos, utilizando varias tasas de descuento.

Respecto al dimensionamiento de la deuda, esta se realiza por el método de deuda esculpida, el cual es un método cuyo resultado es definir cuanta capacidad de deuda le cabe al proyecto y encontrar el perfil de la deuda o gradiente de amortización (*Balloon Payment*), en función de:

- El tenor de la deuda o periodo de la deuda.
- Ratio de cobertura (DSCR).
- Condiciones de mercado del préstamo.
- Indicadores de Bancabilidad.

Para esto se realizan los siguientes pasos:

Paso 1: determinar los flujos de caja, que sirven como fuente de pago del financiamiento, para esto se calcula el CFADS (Cash Flow Available for Debt Service).

Paso 2: acotar los flujos en función del plazo de amortización (tenor) indicado o determinado por el *lender* (financiadore).

Paso 3: determinar con base en los flujos de caja acotados al tenor, que porción de dichos flujos se emplear para atender el servicio de la deuda, para esto se utiliza la ratio de cobertura de la deuda misma DSCR (*Debt-Service Coverage Ratio*).

Paso 4: calcular el valor presente de la porción determinada en el paso 3, empleando como tasa de descuento la tasa de interés del financiamiento.

Paso 5: sumar los valores presentes, para determinar el tamaño máximo de la deuda necesaria a tomar para la ejecución de la solución de autogeneración.

Paso 6: tabla de amortización del proyecto, que se refleja en el flujo de caja.



Figura 9. Cálculo del precio pactado en el PPA.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del Consto nivelado de la energía (LCOE: *Levelized cost of energy*), en este modelo se determina este valor, cuando el Valor Presente Neto del inversionista es igual a cero (VPN=0), bajo la premisa que los ingresos dependen de un precio de generación de energía. Una vez calculado este valor se puede estimar el precio pactado del PPA (ver Figura 9).

3. CASO DE ESTUDIO

Para el caso de estudio, el UNR es la Trilladora de Café la Selva ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas, Colombia. Su consumo anual es de 801.876 kWh/año,

la capacidad de generación resultado de la ingeniería conceptual y básica es de 171,05 kWp (140 kW, ver Figura 10) y la generación estimada para el primer año es de 237,927 kWh/año, bajo un escenario de generación en P90, siendo un escenario conservador teniendo en cuenta que los datos de potencial energético (NREL) contienen errores de sesgo, pero son una de las fuentes más confiables de libre acceso (Acuerdo 1726 de 2024, 2024).

Una vez se realiza el acercamiento con el UNR, se procede a indagar por los aspectos de toma de decisión y motivadores, planteados en las secciones 2.4 y 2.5, para recopilar la ponderación asociada a estos criterios de decisión, por otro lado, se indaga cuál de los modelos piensa que más se ajusta a su necesidad o requerimientos, si quiere implementar un contrato EPC o un firmar un acuerdo PPA. Adicionalmente, se le dan a conocer los riesgos de implementar soluciones de autogeneración y cual sería los potenciales resultados del análisis técnico-financiero que se le presentaría para la toma de decisión.

Una vez generado el acercamiento comercial, se procede a realizar una visita técnica y se recopila la información necesaria para el estudio, entre otra información técnica relevante para el proceso de solicitud de conexión o requerimientos normativos y de diseño de la solución de generación solar fotovoltaica, como se relaciona a continuación:

- Inputs supuestos y escenarios: Tarifa contratada, Escenarios de generación, Precios del mercado, Incentivos tributarios (si se pueden aplicar), Cronograma, Motivadores y aspectos macroeconómicos, Deuda, condiciones de mercado, Impuestos, Normativa y riesgos, Precio pactado PPA esperado.



Figura 10. Levantamiento con Dron de la Trilladora de café la Selva y dimensionamiento de la ingeniería conceptual.

Fuente: Elaboración propia a partir de la fotogrametría de CHEC, grupo epm y PVsyst.

- Balance energético: Demanda anual horaria, matriz, Generación anual horaria.
- Ingeniería conceptual.

Una vez dimensionada la solución, se procede a realizar ingeniería básica que incluye: Dimensionamiento con PVsyst como se muestra en la Figura 10, información primaria y secundaria CAPEX, OPEX y exclusiones. Costos, CAPEX de sostenimiento, Condiciones PPA y Condiciones EPC.

Del resultado del balance energético se puede encontrar: el Balance de energía horario diario, ver Figura 14, el Balance de energía horario anual, ver Figura 15, el Balance de energía horario mensual, ver Figura 16, el Balance de energía horario anual proyectado, ver

Figura 17 y los balances de generación ver Figura 18 y ver Figura 19.

El UNR en su sector productivo demanda mayor cantidad de demanda por estacionalidades del año, que se relacionan con la cosecha de café. Lo que implica que en periodos del año generara mayor cantidad de excedentes hacia la red de Distribución.

Una de las características de la generación solar fotovoltaica es la degradación en el tiempo que depende del tipo de panel a utilizar y del mantenimiento que se le dé a estos bienes, en la Figura 18 se puede observar que en el modelo se considera este factor de degradación, el cual es generado por la salida de la ingeniería conceptual elaborada en PVsyst.

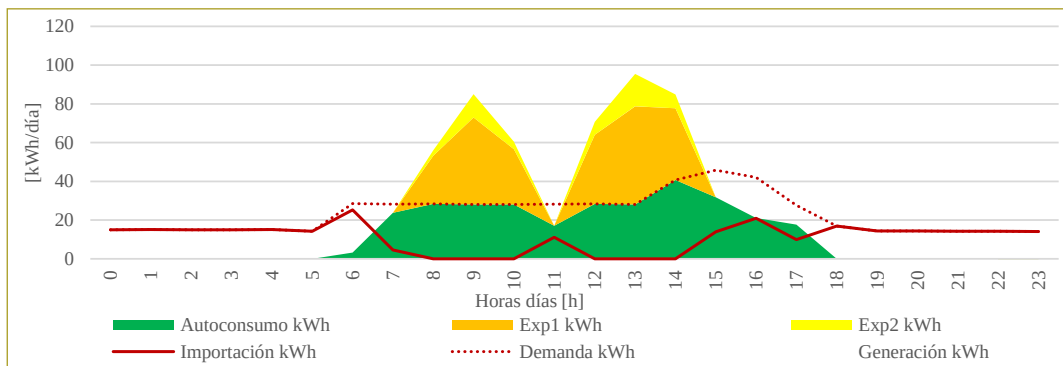


Figura 11. Resultados del balance energético horario diario (P90) para el día 4 de julio.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Resultados del balance energético horario del primer año de operación (P90)

Fuente: Elaboración propia.

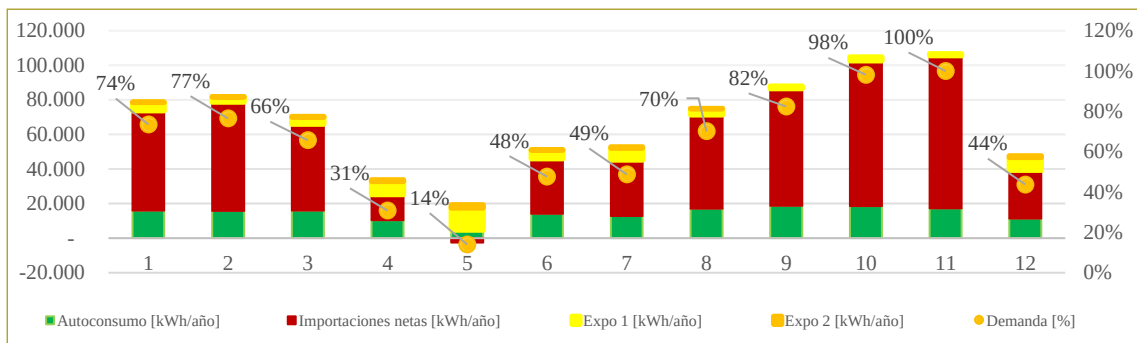
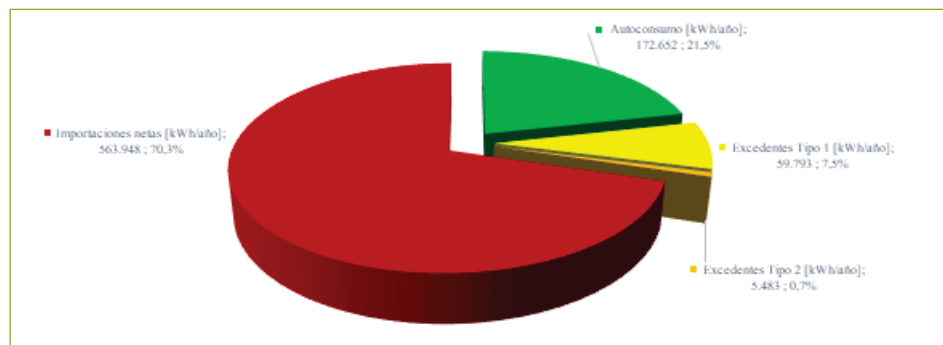


Figura 13. Resultados balance energético horario mensual del primer año de operación (P90)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14.
Resultados
del balance
energético
horario anual
proyectados
(P90)

Fuente: Elaboración propia.

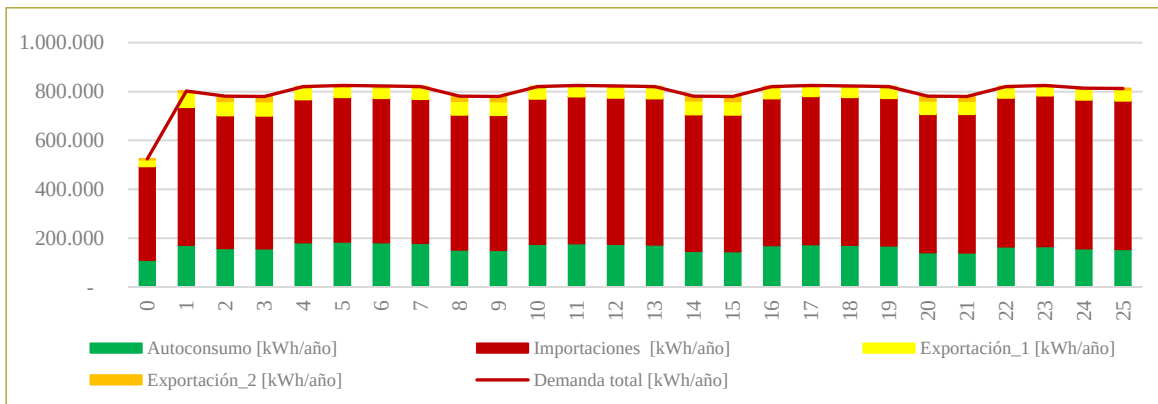


Figura 15. Resultados
de generación de
energía año 1 (P90)

Fuente: Elaboración propia.

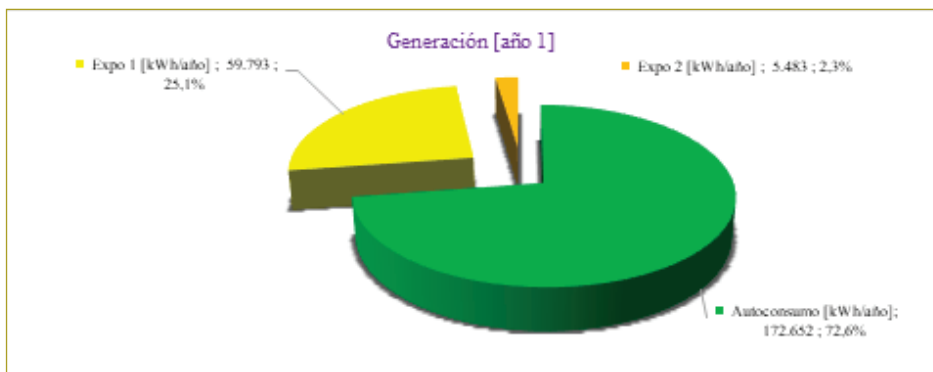
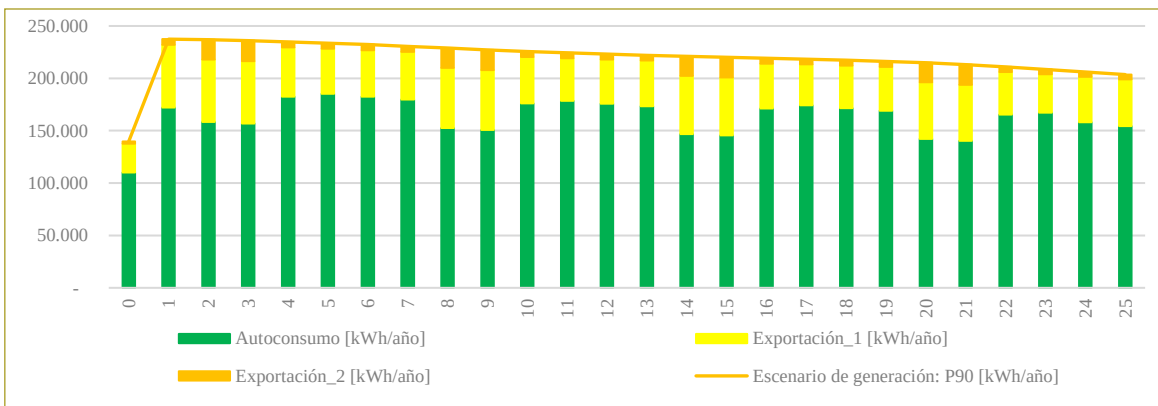


Figura 16. Resultados
de generación de
energía proyectados
(P90) a 25 años.

Fuente: Elaboración propia.



De los inputs, escenarios y supuestos se presentan las siguientes condiciones para el caso de estudio:

- Tarifa: 481,74 \$/kWh (nov.-22), Tarifa Horaria
- Precios Pactado PPA: 300,41 \$/kWh (nov.-22)
- Indexación Min (IPP, IPC)
- Nivel de tensión: 3 (33 kV)
- CAPEX: 702.18 \$MCOP
- Exclusiones: 45,86 \$MCOP (compensación de energía reactiva entre otros)
- CAPEX total de inversión: 748.04 \$MCOP
- OPEX: 17,10 \$MCOP/año
- Precios del mercado.
- Escenario de generación: P90 (PVsyst)
- Periodo de evaluación: 25 años
- Rendimiento específico: 1.391 kWh/kWp
- PPA: Pague lo generado
- Base de datos: NREL
- Incentivos tributarios:
- Devolución del IVA
- Deducción de renta a 15 años
- Depreciación acelerada 10 años

- Deuda: DFT fija + 4 puntos básicos
- Ratio de cobertura (DCSR): 1,2x
- Tenor de la deuda EPC: 6 años
- Tenor de la deuda PPA: 1 años
- Excedentes: créditos de energía – Net Metering
- Utilizar la totalidad de los techos útiles para instalar paneles solares fotovoltaicos.
- Generar energía con generación renovable.
- Minimizar la dependencia energética de la red.
- Nuevos modelos de negocio sostenibles.

Generando los resultados que se muestran en la Tabla 1 para ambas alternativas, EPC y PPA. Se observa que ambas alternativas son factibles, bajo criterios de decisión del usuario final, destacando: los análisis financieros, técnicos y de riesgos, sus estados financieros (principalmente la capacidad de endeudamiento), los requerimientos normativos vigentes, la planeación estratégica (crecimiento en su actividad principal), las políticas de producción sostenible, el generar su propia energía, el abastecer parte de su demanda de, entre otros motivadores estratégicos (cualitativos o cuantitativos) de cada usuario no regulado.

Las Figuras 17 y 18 presentan los resultados de reducción de costos en el gasto del servicio de energía eléctrica para las dos alternativas respectivamente, se puede observar que el porcentaje es considerablemente mayor para la alternativa EPC.

3.1. Análisis Comparativo

Con la finalidad de comparar y validar los costos de inversión (CAPEX), el factor de planta (FP) y el costo de generación o costo nivelado de energía (LCOE) del caso de estudio, tomando como referencia la publicación *Renewable Power Generation Costs in 2021* (International Renewable Energy Agency, 2022), se presentan las gráficas comparativas de los costos con los costos obtenidos.

Las figuras 19, 20 y 21 presentan un análisis comparativo del caso de estudio con datos globales para validar la consistencia del modelo desarrollado. La figura 19 muestra el CAPEX del proyecto comparado con los percentiles y promedios ponderados globales, evidenciando que el costo de inversión del caso de estudio es inferior al promedio global. La figura 20 compara el costo nivelado de energía (LCOE) obtenido con los valores globales, indicando que el LCOE del proyecto es competitivo y se encuentra por debajo del promedio ponderado mundial. Finalmente, la figura 21 presenta la comparación del factor de planta, donde el valor del caso de estudio se sitúa dentro del rango esperado y cercano al promedio global, lo que confirma la viabilidad técnica del proyecto en términos de generación energética. Estas comparaciones respaldan la robustez y precisión del modelo técnico-financiero desarrollado para la autogeneración en usuarios no regulados en Colombia.

Tabla 1
Salidas del modelo

Descripción Salida del modelo	EPC	PPA
Porcentaje promedio de Ahorros e ingresos esperados	31.4%	11.9%
Ahorros e ingresos esperados primer año	141.53 \$MCOP	60.18 \$MCOP
Estructura de capital	Deuda 81.75% Equity 18.25%	Deuda 98.26% Equity 1.74%
Inversión	748.04 \$MCOP	45.86 \$MCOP
Deuda	611.53 \$MCOP	45.06 \$MCOP
TIR	22.86%	175.8%
VPN	879.3 \$MCOP	483.7 \$MCOP
PRI	3.4 años	0.4 años
ROI	54.7%	90.8%
Rentabilidad esperada	825,7 \$MCOP	453.1 \$MCOP
LCOE	249.41 \$COP/kWh	
Reducción de emisiones TonCO ₂ eq	2,874 tonCO ₂ eq/vida útil	

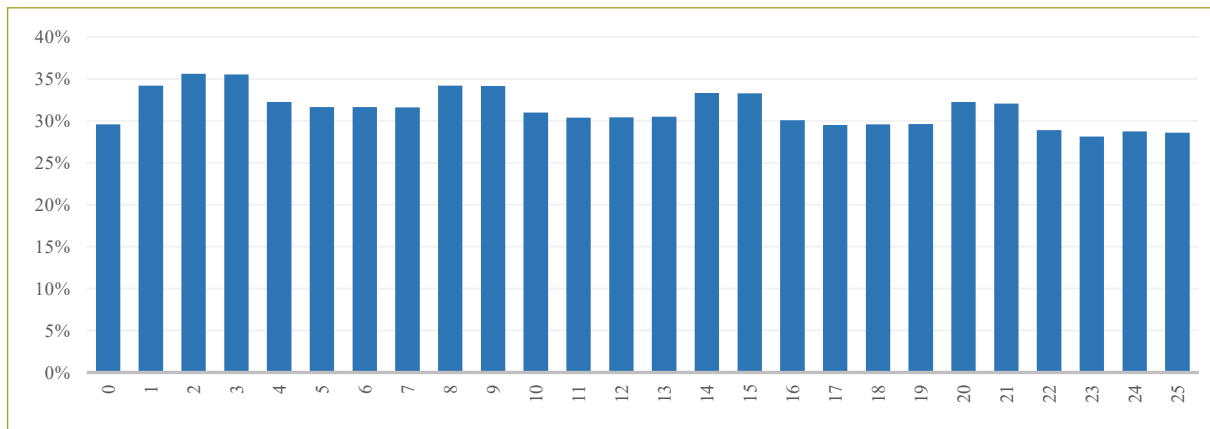


Figura 17. Resultados de reducción porcentual en el gasto de servicio de energía eléctrica, al contratar un EPC proyectado a 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

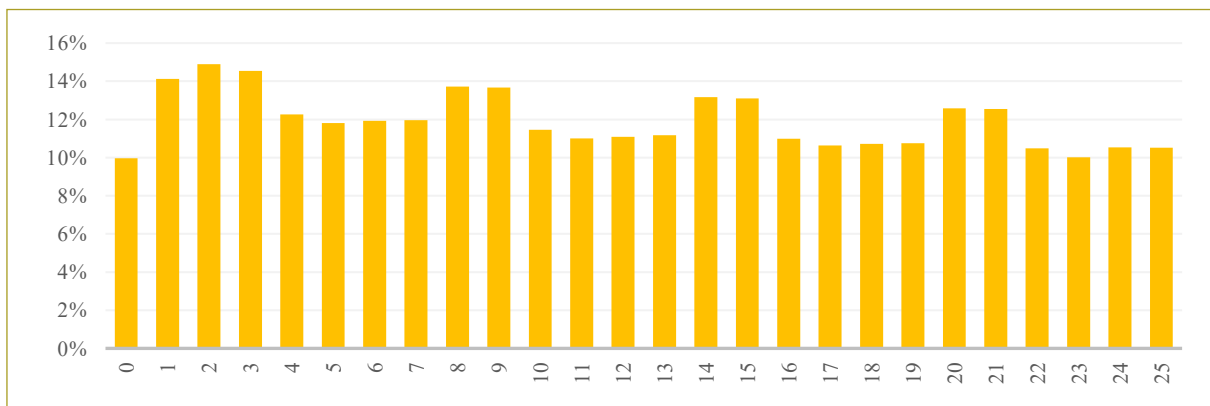


Figura 18. Resultados de reducción porcentual en el gasto de servicio de energía eléctrica, al firmar un PPA

Fuente: Elaboración propia.

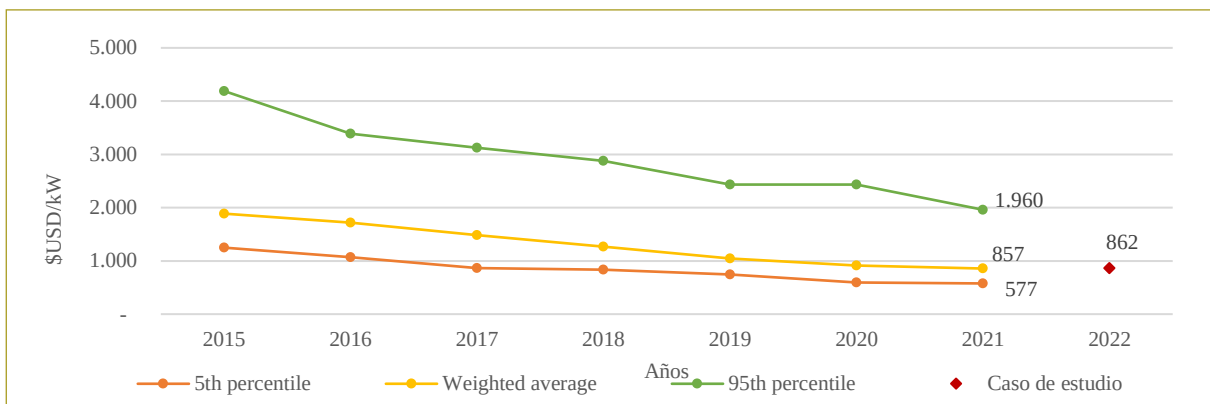


Figura 19. Análisis comparativo del CAPEX con los costos promedios ponderados globales.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IRENA y resultados del estudio.

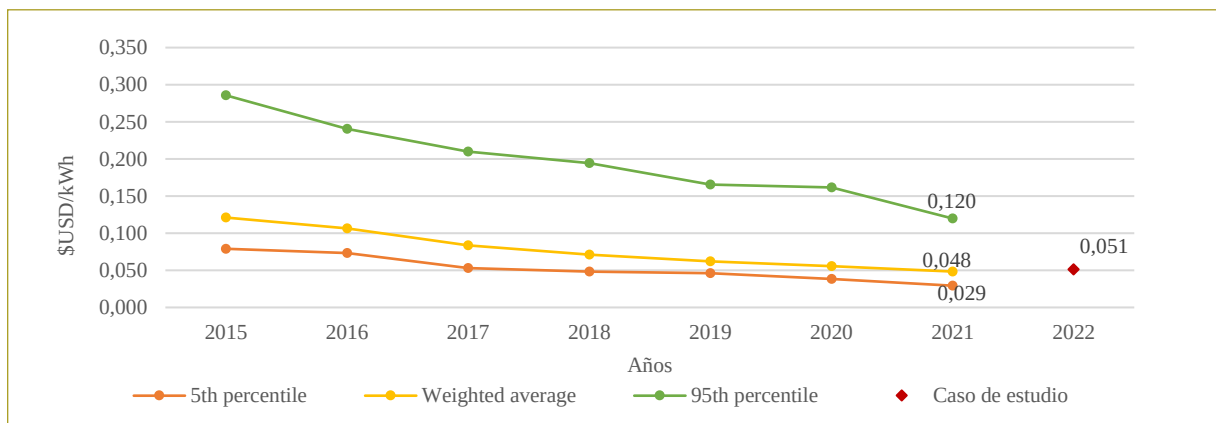


Figura 20. Comparación del LCOE obtenido para el caso de estudio y los promedios ponderados globales.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IRENA y resultados del estudio.

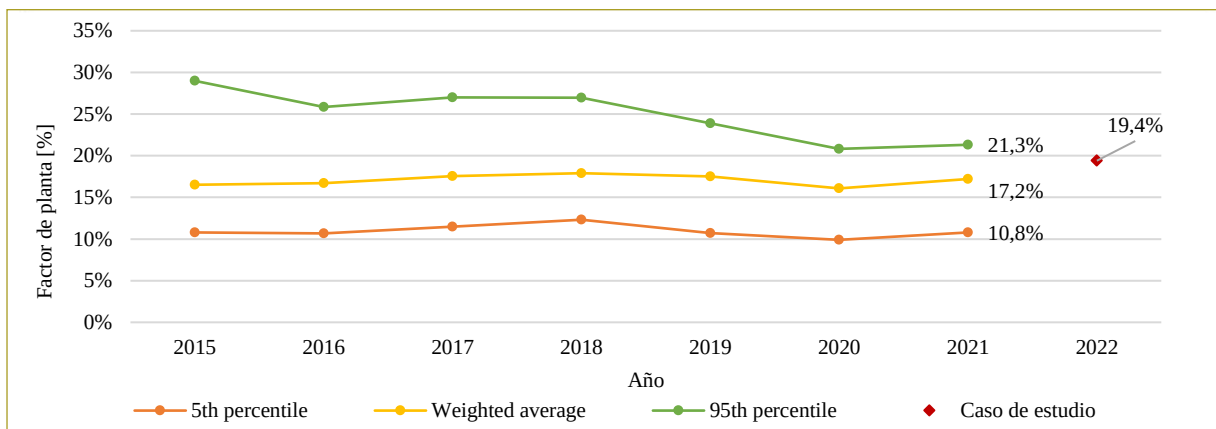


Figura 21. Comparación entre valores de Factor de planta obtenido para el caso de estudio y los promedios ponderados globales.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IRENA y resultados del estudio.

CONCLUSIONES

En los últimos dos años la regulación vigente en Colombia relacionada con la actividad de autogeneración ha tenido avances importantes para permitir que los usuarios implementen soluciones de autogeneración a partir de fuentes no convencionales de energía y estos sean conectados al SIN, lo que evidencia el interés de la política pública en democratizar y descentralizar la generación de energía en el país.

El modelo desarrollado permite brindarles a los usuarios no regulados en Colombia, unos resultados con los cuales puedan tomar decisiones de inversión o de compra de energía, al implementar potencialmente una solución de autogeneración solar fotovoltaica.

Para el caso de estudio, se le recomendó implementar la solución de autogeneración al usuario no regulado,

utilizando la totalidad de las cubiertas útiles, por medio de un contrato EPC, teniendo en cuenta sus condiciones particulares, esto evidencia que no necesariamente el usuario tiene un beneficio mayor si cierra un PPA derivado de la implementación de una solución de autogeneración.

Al realizar la comparación del CAPEX, del Factor de Planta y del costo nivelado de energía (LCOE) con la publicación de IRENA en la Análisis comparativo del caso de estudio, se puede validar que los resultados de la herramienta desarrollada en este proyecto de grado son consistentes y presentan un grado de certeza elevado.

Hay herramientas como SAM (*System Advisor Model*) desarrollada por NREL y RetScreen desarrollado por el gobierno de Canadá, con los cuales se pueden realizar dimensionamientos y análisis financieros de soluciones

de generación (no autogeneración). Son herramientas que no consideran el análisis de soluciones de autogeneración conforme lo establecido en la normativa vigente colombiana (créditos de energía y tipos de excedentes) y adicionalmente no cuentan con el detalle de los precios del mercado, los incentivos tributarios entre otras consideraciones particulares tenidas en cuenta en esta herramienta, por ende, tampoco un análisis de balance de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo 1726 de 2024 (2024). <https://www.cno.org.co/content/acuerdo-1726-por-el-cual-se-aprueba-el-protocolo-para-la-aplicacion-de-la-metodologia-de>
- International Renewable Energy Agency. (2022). *Renewable power generation costs in 2021*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf
- Krüger, P., Landier, A., & Thesmar, D. (2015). The WACC Fallacy: The Real Effects of Using a Unique Discount Rate. *The Journal of Finance*, 70(3), 1253–1285. <https://doi.org/10.1111/jofi.12250>
- Mohamadi, F. (2021). Introduction to project finance in renewable energy infrastructure: Including public-private investments and non-mature markets. In *Introduction to Project Finance in Renewable Energy Infrastructure: Including Public-Private Investments and Non-Mature Markets*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68740-3>
- PVsyst SA. (2025). *PVsyst Photovoltaic Software* (8). <https://www.pvsyst.com/es/>
- Resolución CREG 011 de 2009, 1 (2009). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0011_2009.htm
- Resolución CREG 024 de 2015, Pub. L. No. 024, 1 (2015). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0024_2015.htm
- Resolución CREG 062 de 2000 (2000). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0062_2000.htm
- Resolución CREG 080 de 2019, 1 (2019). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0080_2019.htm
- Resolución CREG 119 de 2007, 1 (2007). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0119_2007.htm
- Resolución CREG 135 de 2021 (2021). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0135_2021.htm
- Resolución CREG 174 de 2021 (2021). [https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee0709c02/c99b2f316a59fffb052587950077d9d1/\\$FILE/Creg174-2021.pdf](https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee0709c02/c99b2f316a59fffb052587950077d9d1/$FILE/Creg174-2021.pdf)
- Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2012). *Finanzas corporativas*. Seguin, R., Woyak, J., Costyk, D., Hambrick, J., & Mather, B. (2016). *High-Penetration PV Integration Handbook for Distribution Engineers*. <https://docs.nrel.gov/docs/fy16osti/63114.pdf>
- Vélez, L. G. (2022, September 12). *El alza en las tarifas de electricidad*. <https://luisguillermovelezalvarez.blogspot.com/2022/09/el-alza-en-las-tarifas-de-electricidad.html?m=1>
- XM S.A. (2023a). *Autogeneradores a Pequeña Escala*. Sinergox. <https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Informes/AGPE.aspx>
- XM S.A. (2023b). *Demanda Comercial, Real y Pérdidas de Energía*. Sinergox. <https://sinergox.xm.com.co/dmnd/Paginas/Informes/DemandaRealPerdidas.aspx>
- XM S.A. (2023c). *Precio Promedio Ponderado de Bolsa*. Sinergox. <https://sinergox.xm.com.co/trpr/Paginas/Precios/preprocon.aspx>

Sección **ESPECIAL**



En homenaje al ingeniero Luis Guillermo Aycardi Barrero

**VII Encuentro de Ingenieros de
SUELOS Y ESTRUCTURAS**

**ABRIL
23 y 24
2025**

El VII Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras constituye un espacio académico-profesional, orientado al intercambio de experiencias entre consultores, constructores, investigadores y docentes en el campo de la ingeniería estructural y geotécnica. A diferencia de otros escenarios académicos, centrados exclusivamente en resultados experimentales o modelaciones teóricas, este encuentro se caracteriza por la discusión de problemas reales de ingeniería y por la reflexión técnica derivada de la práctica profesional.

Los artículos incluidos en esta sección corresponden a trabajos presentados en el evento y sometidos posteriormente a un proceso de adaptación al formato científico y a la evaluación editorial. El objetivo de esta publicación no es reproducir memorias de un congreso, sino preservar conocimiento técnico validado por la comunidad especializada y

hacerlo accesible a un público académico más amplio.

En las contribuciones aquí reunidas se abordan aspectos relacionados con cimentaciones especiales, estabilidad de excavaciones, mejoramiento del terreno, comportamiento mecánico del suelo y evolución normativa de la geotecnia en Colombia. En conjunto, ofrecen una visión integral del estado actual de la práctica geotécnica, y evidencian la interacción entre análisis teórico, observación de campo y criterio profesional.

Con esta sección especial, la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* busca fortalecer el vínculo entre la academia y la práctica profesional, reconociendo que gran parte del conocimiento en ingeniería civil se construye en la obra y que su documentación sistemática resulta fundamental para mejorar la seguridad, la calidad y la sostenibilidad de la infraestructura.



Desarrollos recientes de la normativa geotécnica

Recent Developments in Geotechnical Regulations

HÉCTOR PARRA FERRO

Ingeniero Civil. Universidad de los Andes.

ingeciencias@yahoo.com

Recibido: 20/01/2025 Aceptado: 01/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza la evolución reciente de la normativa geotécnica en Colombia, y se hace énfasis en el papel del criterio del ingeniero geotécnico dentro de los procesos de diseño, revisión y construcción de obras de ingeniería civil. A partir de un recorrido histórico por los principales desarrollos normativos, incluyendo la transición desde los primeros lineamientos técnicos hasta la consolidación de códigos como la NSR-98 y la NSR-10, se examinan los cambios conceptuales que han marcado la práctica profesional en el país.

A lo largo del presente artículo se discute la relación entre la normativa geotécnica y estructural, así como la influencia de eventos académicos, institucionales y técnicos en la construcción progresiva de los marcos regulatorios vigentes. Desde una perspectiva reflexiva y técnica, se destacan los alcances y limitaciones de la normativa, subrayando la necesidad de interpretar los códigos como herramientas de apoyo al juicio profesional y no como sustitutos del análisis ingenieril.

Finalmente, se plantean consideraciones sobre los retos actuales y futuros de la normativa geotécnica, en un contexto de creciente complejidad de las obras y de mayores exigencias en materia de seguridad, desempeño y responsabilidad profesional.

Palabras claves: normativa geotécnica, ingeniería geotécnica, criterio del ingeniero, códigos de diseño, ingeniería estructural.

Abstract

This article analyzes recent developments in geotechnical regulations in Colombia, emphasizing the role of geotechnical engineers in the design, review, and construction of civil engineering works. Based on a historical overview of the main regulatory developments, including the transition from the first technical guidelines to the consolidation of codes such as NSR-98 and NSR-10, the conceptual changes that have marked professional practice in the country are examined.

The article discusses the relationship between geotechnical and structural regulations, as well as the influence of academic, institutional, and technical events on the progressive construction of current regulatory frameworks. From a reflective and technical perspective, the scope and limitations of regulations are highlighted, emphasizing the need to interpret codes as tools to support professional judgment, rather than as substitutes for engineering analysis.

Finally, considerations are raised about the current and future challenges of geotechnical regulations, in the context of increasing complexity of works and greater demands in terms of safety, performance, and professional responsibility.

Keywords: geotechnical regulations, geotechnical engineering, engineer's judgment, design codes, structural engineering.

INTRODUCCIÓN

La joven ciencia de la geotecnia ha experimentado en nuestro medio una intensa evolución en la normativa que la rige, desde los primeros manuales editados por la Sociedad Colombiana de Ingenieros en la década de los setenta, hasta el hoy muy completo y en constante revisión Reglamento de Construcción Sismorresistente NSR, cuya última versión es la del 2010 (NSR-10).

La norma sismorresistente nació como una necesidad de llenar un vacío en la normativa de ingeniería a raíz del terremoto que sacudió a Popayán en 1983, por medio de un decreto presidencial. Era puramente estructural, aunque ya se incluían algunos aspectos de la geotecnia, como el tipo de perfiles de suelos para predecir las respuestas sísmicas del suelo sobre las estructuras ante la presencia de sismos.

Hemos pasado de una ausencia total de normas geotécnicas en los años setenta, a las normas que hoy se incluyen en el NSR-10, las cuales cubren buena parte de los interrogantes geotécnicos con los que se puede enfrentar el ingeniero en un proyecto. No obstante, la transición desde ausencia total de normas hasta disponer de una norma tan desarrollada como el NSR-10 ha generado que la ingeniería pierda de vista el origen de las motivaciones que dieron lugar a esas normas. Este olvido, propio del paso del tiempo, origina conflictos sobre lo que es la interpretación de una norma y el cumplimiento de la letra menuda de esta, produciendo el efecto que algunos autores han denominado la “ultrajuridicidad” de la ingeniería, refiriéndose a que se volvió más importante cumplir la letra menuda de una norma que el objeto para el cual se creó. Este término también se aplica a aquellas revisiones de curadurías o interventorías en las que el origen y la motivación de una norma se pasan por alto y solamente se ejerce una revisión jurídica del cumplimiento de la norma y no una revisión de ingeniería.

El autor considera de vital importancia que las nuevas generaciones tengan conocimiento del origen y evolución de las normas que hoy aplican, para tener presentes las motivaciones y problemas principales que dieron origen a esas normas.

Así mismo, se enfatiza en las principales diferencias procedimentales que distinguen a la ingeniería geotécnica de la estructural; en este sentido, se hace una descripción de lo que en el NSR se ha denominado el “criterio del ingeniero geotécnico”, como un insumo

clave en los estudios geotécnicos, y las recomendaciones de cimentación, excavación y obras de tierra.

LAS PRIMERAS NORMAS: NORMA AIS-100

En el Decreto 1400 del 7 de julio de 1984, que da origen al Código de Construcciones Sismorresistentes en su primera versión, y a la norma AIS-100, un código eminentemente estructural, aunque con un aporte mínimo a lo geotécnico, se incorporaron las siguientes consideraciones:

Capítulo E.5. CIMENTACIÓN. Este aparte del código cubre una hoja y media de todo el documento (300 hojas), y empieza con una disposición que ilustra el estado de cosas en el campo geotécnico: **“E.5.1.1.1.** Cuando para obtención de la licencia de construcción no se exija estudio de suelos, deben cumplirse los siguientes requisitos mínimos...”.

De la lectura de este aparte, concluimos que no para todas las estructuras se exigía estudio de suelos. El decreto continúa con una recomendación de cómo hacer una comprobación de campo por medio de un apique a 2 m de profundidad, y concluye que la fatiga de trabajo no puede ser mayor que $0,5 \text{ kg/cm}^2$.

Sigue el decreto con una de las más importantes recomendaciones que hoy en día también podemos considerar, y que se pasa por alto por lo sencilla, frente a normas cada vez más robustas: **“E.5.1.1.1, literal c).** “Investigar el comportamiento de edificaciones similares en las zonas aledañas desde el punto de vista de asentamientos y deslizamientos, demostrando que el comportamiento ha sido adecuado”.

Este tipo de disposición del código hace referencia a que si en una zona ciertas soluciones han sido adecuadas para cierta clase de estructuras, entonces el ingeniero va formando su criterio y se vale de lo que observa en los alrededores de un proyecto para confirmar o revisar las recomendaciones de cimentación del proyecto que está estudiando.

Estas acciones son las que, en versiones más modernas del “código”, que migró hacia el término “norma”, forman parte del “Criterio del ingeniero geotecnista”, que se menciona en varios apartes de las últimas versiones de la NSR-98 y la NSR-10, en las cuales se le da peso al criterio de este ingeniero, y se le asignan responsabilidades, como por ejemplo cambiar sondeos por apiques, o escoger un método de análisis sobre otros.

La importancia de la experiencia del ingeniero, la experiencia de la zona (soluciones que se han dado en los alrededores) y el criterio del ingeniero en su análisis deben continuar siendo los principales motores de un estudio geotécnico que, además, debe cumplir las disposiciones de las normas.

En esta primera versión del código (1984), se incluyen en el capítulo A.2. “Zonas de riesgo sísmico y espectros de diseño”, sección A.2.4, una categorización de los perfiles de suelos típicos, y en la sección A.2.4. “Efectos locales”, la definición de perfiles de suelos típicos de respuesta sísmica, los perfiles S1, S2 y S3, según las siguientes definiciones:

“Perfil de suelo S1: a) roca de cualquier característica, ya sea cristalina o lutítica, que tiene una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 750 m/seg, o b) perfiles conformados por suelos duros con un espesor menor de 60 m, compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras.

Perfil de suelos S2. Es un perfil donde entre la roca y la superficie existen más de 60 m de depósitos estables de arcillas duras o suelos no cohesivos.

Perfil de suelos S3. Es un perfil donde entre la roca y la superficie hay más de diez metros de depósitos de arcillas cuya dureza varía entre mediana y blanda, con o sin estratos intercalados de arenas u otros suelos no cohesivos”.

El código concluye con un coeficiente de sitio según estas definiciones, asignando un coeficiente 1 para S1, 1.2 para S2 y 1.5 para S3, que busca castigar las respuestas de los suelos blandos sobre los duros. También se definen los coeficientes de importancia.

Esta primera versión de la respuesta sísmica del suelo, muy simplificada, contrasta con una información bastante completa y exhaustiva del tema sísmico de la que disponemos en la actualidad los ingenieros, de la cual forman parte las microzonificaciones sísmicas y los espectros de respuesta que se han desarrollado con modelos sofisticados y con la importante información que suministra la red de acelerógrafos y demás instrumentación especializada, como la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), que se ha instalado en los últimos años. Recordamos aquí al ingeniero Alberto Sarria Molina, quien orientó el desarrollo de toda la sismología para ingeniería del país. De estos tres perfiles típicos de suelos para respuesta sísmica (en el país), hoy pasamos, en el caso particular de la ciudad de Bogotá

con su detallada microzonificación sísmica, a dieciséis perfiles de suelos de respuesta sísmica con sus espectros de respuesta particulares.

CÓDIGO COLOMBIANO DE GEOTECNIA

La Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG) inició hacia el año 2000, junto con la Comisión de Geotecnia de la SCI, la redacción de lo que se bautizó como Código Colombiano de Geotecnia. Se alcanzaron a discutir los índices y el contenido de ese documento, pero debido a que la financiación con que contaba el NSR estaba bajo la tutela de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), y por la conveniencia de tener lo estructural y lo geotécnico en un mismo documento, los esfuerzos migraron hacia la participación en el desarrollo del NSR; de esa manera, se desechó la idea de que el Código Colombiano de Geotecnia fuera un documento independiente.

ENCUENTROS DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

La Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por iniciativa de nuestro querido colega Luis Guillermo Aycardi, ha organizado anualmente desde 1991 los encuentros de ingenieros de suelos y estructuras, con el noble propósito de acercar los ingenieros geotécnicos a los estructurales, ya que hasta la fecha la tendencia había sido que los profesionales de estas dos disciplinas no se reunían para discutir los problemas que tenían en común, pese a que ambos dependen el uno del otro.

Este tipo de encuentros acercaron a la ingeniería geotécnica con la estructural, y las siguientes versiones de las normas ya incluyeron lo geotécnico como un insumo clave de lo estructural. Agrupar las Jornadas Geotécnicas y las Estructurales de la Sociedad Colombiana de Ingenieros en un solo evento demuestra que este acercamiento es un hecho, y que la ingeniería está siguiendo el llamado de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería y del ingeniero Luis Guillermo Aycardi. No obstante, la codificación de aspectos estructurales es más apropiada en el campo estructural que en el geotécnico, puesto que debido a la heterogeneidad del suelo y la dificultad en su modelación, el criterio del ingeniero geotécnico es fundamental.

NSR-98. NORMAS COLOMBIANAS DE CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE

En esta primera versión revisada del Decreto 1400 de 1984 y la Ley 400 de 1997, se desarrolló la versión más detallada del código sismorresistente, se incorporaron criterios de diseño geotécnico y se reglamentó detalladamente el ejercicio de los estudios geotécnicos.

En la definición del número de sondeos necesarios para un estudio de suelos se introdujeron varios criterios novedosos, como la definición de unidades de construcción o la variabilidad del subsuelo, y lo que de estos se desprende como número mínimo de sondeos y su profundidad mínima. Esta disposición es bastante irrelevante si consideramos la discutible calidad de los sondeos geotécnicos, cosa que ocurre mucho en nuestro medio. Hacer un sondeo geotécnico no es solamente abrir un hueco, es una actividad de ingeniería en la que se tienen que cuidar el muestreo y los ensayos dentro del sondeo.

Recordamos en este capítulo a los ingenieros Álvaro J. González y Augusto Espinosa Silva, quienes fueron protagonistas importantes de este documento.

NSR-10. REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE

En esta nueva versión de la norma no solo se perfecciona y se completa lo dicho en el NSR-98, sino que se reorganizan algunos temas.

En la definición del número de sondeos se descarta el criterio de variabilidad del subsuelo que aparecía en el NSR-98, aspecto que considero un error, porque precisamente este es el criterio que puede reducir o aumentar el número de sondeos necesarios para un estudio geotécnico. En el país se ha exteriorizado cierta inconformidad de ingenieros de regiones diferentes de Bogotá en esta materia, la cual consideran exageradamente “bogotana”, por la existencia de los suelos blandos de la sabana de Bogotá y la geotecnia que exige esta formación geológica.

El criterio del ingeniero geotecnista debe ser clave para definir el número de sondeos necesarios para un estudio que le permita obtener toda la información relevante para resolver los aspectos geotécnicos de un proyecto. Y nos referimos a sondeos bien ejecutados.

En buena hora, la Sociedad Colombiana de Geotecnia ha organizado cursos teóricos y prácticos de lo exigente que es efectuar sondeos exploratorios y otros

métodos con excelencia en la calidad de ellos, mediante el “Curso Internacional de Exploración, Caracterización y Mejoramiento del Suelo”, del cual ya se han celebrado cinco versiones.

JORNADAS GEOTÉCNICAS Y ESTRUCTURALES DE LA SCI. FORO SOBRE GEOTECNIA DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Las Jornadas Geotécnicas, organizadas por la SCI desde 1976, han sido un importante escenario para debatir los aspectos geotécnicos de la ingeniería. Recientemente, asistimos a su vigésima edición, con las XX Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, las cuales se desarrollaron con las Jornadas Estructurales en su edición 23, ya que hasta la fecha habían sido eventos separados. Gracias a la cercanía que se logró entre la Comisión de Geotecnia de la SCI y la SCG, se pudieron hacer valiosos aportes para la normativa.

En 1988, se incorporó el Foro sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá en el programa de las Jornadas Geotécnicas de la SCI, por considerar este tema de especial dificultad y cuidado para la realización de estudios geotécnicos en la sabana de Bogotá. El autor del presente artículo y el geólogo Alberto Lobo-Guerrero Uscátegui fueron decisivos en la implementación de este foro, del cual hemos celebrado varias ediciones.

RESOLUCIONES DEL IDIGER PARA ESTUDIOS DE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA. RESOLUCIÓN 111 DEL 10 DE MAYO DE 2022

El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (Idiger) (antes OPES, UPES y DPAE) se ha encargado de desarrollar reglamentación para estudios especiales en zonas de amenaza de remoción en masa, con la colaboración de la Sociedad Colombiana de Geotecnia, la Sociedad Colombiana de Ingenieros, las universidades, las curadurías y los consultores.

Vale la pena recordar también el origen de estas normas. Por los años setenta y ochenta, uno de los mayores dolores de cabeza de la ciudad eran los urbanizadores piratas, que comercializaban predios llenos de trampas geotécnicas, tales como grandes canteras antiguas para la fabricación de ladrillo, con rellenos no consolidados, a las cuales les pasaban un buldócer para aparentar un terreno uniforme y plano que luego dividían en lotes minúsculos que vendían a personas humildes, quienes

los compraban confiadas en que estaban asegurando su futuro para vivir. Al poco tiempo, con las lluvias, los terrenos se degradaban hasta un punto que era imposible construir, o si ya estaba construido se caía lo que se había edificado.

La Alcaldía terminaba demandada y condenada a pagar indemnizaciones a los afectados, solo por haber expedido una licencia de urbanización. A partir de estos casos, el Idiger, con sus resoluciones de estudios especiales de amenaza y riesgo, frenó la actividad de la urbanización pirata, y hoy en día los estudios geotécnicos para urbanizaciones en zonas de mediana o alta amenaza de remoción en masa se estudian con todo el detalle necesario, además de que se exigen obras de mitigación de las amenazas como parte de los requisitos para poder expedir el permiso urbanístico.

NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO DE PUENTES CCP 14, INVÍAS

En el documento desarrollado por el Instituto Nacional de Vías (Invías) se establecen criterios mínimos para el diseño de puentes. En el capítulo 10, “Cimentaciones”, se dan guías importantes para el diseño de cimentaciones de puentes y sus procedimientos de investigación y diseño. Destacamos en la introducción la advertencia del alcance de la norma (la cual sigue el modelo de normas AASHTO), que es aplicable a todas las normas que desarrollamos: “Esta norma no está concebida para suplantar la capacidad ni el criterio profesional del diseñador, solamente estipula los requisitos mínimos necesarios para proveer la seguridad pública”.

TÍTULO H, EN REVISIÓN POR PARTE DE LA SCG

En la actualidad, se encuentra en revisión una nueva versión del título H dentro de la Comisión de Normativa de la Sociedad Colombiana de Geotecnia. Se incorporan precisiones sobre métodos de diseño y de control, y se vuelve a considerar la uniformidad geotécnica del sitio para determinar el número de sondeos requeridos para un proyecto. El tema de efectos de la arborización sobre los suelos y estructuras se está completando.

COMPONENTES DEL CRITERIO DEL INGENIERO GEOTÉCNICO

El ejercicio de la ingeniería geotécnica difiere en sus procedimientos de la práctica de la ingeniería estructural. En los diagramas que se presentan a continuación, se ilustra cómo el ingeniero geotécnico se basa en una investigación de campo, en información geológica y en ensayos de suelos *in situ* y en laboratorio de suelos, para identificar los parámetros claves de resistencia, compresibilidad y otros aspectos del suelo que investiga para el diseño de una cimentación. Este ejercicio, que es propio de cada lugar y por lo tanto es particular para un proyecto dado, es el que arroja parámetros geotécnicos claves para que el ingeniero estructural dimensione elementos fundamentales de la cimentación, como presiones permisibles de contacto, empujes de tierras sobre muros y otros parámetros que sean claves para el diseño estructural de elementos estructurales que dependan de la geotecnia del sitio y del proyecto.

Vale la pena aclarar que el ingeniero geotécnico ha de empezar por hacer una observación detallada del sitio del proyecto y de su entorno, por lo que parte de su criterio estará conformado por los siguientes ítems:

- Estado general del terreno, accidentes geotécnicos conocidos en el área y zonificaciones geotécnicas regionales.
- Geología y geomorfología del sitio.
- Tipo, estado y antigüedad de estructuras existentes aledañas.
- Soluciones que se han dado en los alrededores a problemas de cimentación, excavación y obras de tierra.
- Características claves de los patrones de drenaje y de la morfología del lugar.
- Comportamiento de estructuras aledañas en su vida útil y ante sismos.

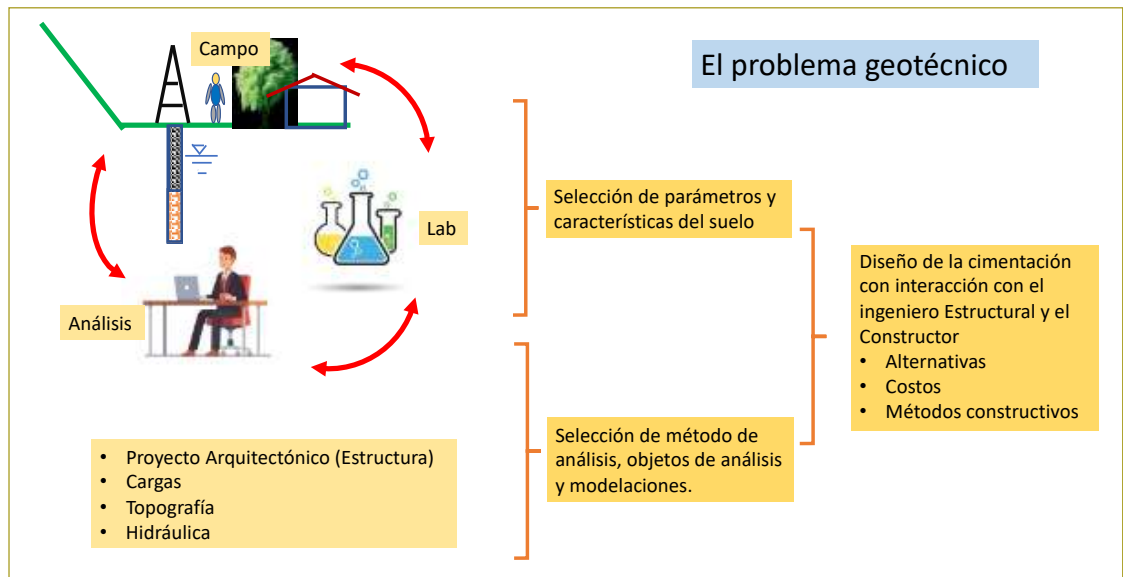
Un esquema que ilustraría entonces el ejercicio del cálculo estructural sería el siguiente (figura 2).

En esta figura se puede apreciar que el ingeniero estructural se basa en parámetros estandarizados de los materiales homologados, y recibe del ingeniero geotécnico los parámetros geotécnicos claves que se relacionan con la interacción entre estructuras y suelos.

A su vez, el ingeniero geotécnico recibe del ingeniero estructural la información sobre cargas de servicio.

Figura 1.
Esquema
ilustrativo
del problema
geotécnico

Fuente: Elaboración propia.



De la complejidad del proyecto también es posible concluir que para mayor complejidad, mayor dificultad en el estudio y diseño, y para menor dificultad, menor complejidad, como se ilustra a continuación (figura 3).

En las primeras normas se hablaba de si un proyecto requería estudio de suelos. Hoy en día, se exige para todo proyecto un estudio detallado, aunque sea un caso fácil. Reiteramos que para cierto tipo de proyecto un ingeniero geotécnico entrenado puede hacer un estudio de suelos con solo una anotación en el libro de obra, o con un informe corto.

COMENTARIOS FINALES SOBRE ALGUNOS ASPECTOS DE LA NORMA NSR-10

Acerca del número de sondeos requeridos para un estudio geotécnico de edificaciones

Recordemos los antecedentes históricos que regían la práctica de la geotecnia en la década de los ochenta. En un proyecto típico de un edificio en un predio de tamaño pequeño, o mediano, la práctica era hacer tres sondeos exploratorios con muestreo y ensayos de campo. ¿Ubicados cómo? Si el terreno es plano, dos esquinas y el centro. Si el ingeniero además ha investigado la geología de la zona donde trabaja, posiblemente la práctica de

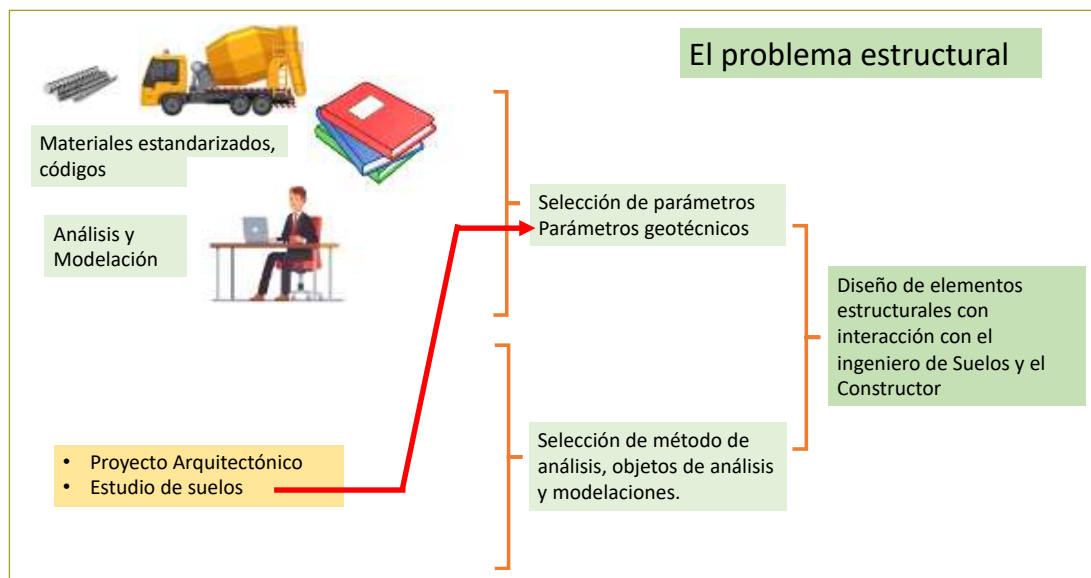


Figura 2. Esquema
ilustrativo
del problema
estructural

Fuente: Elaboración propia.

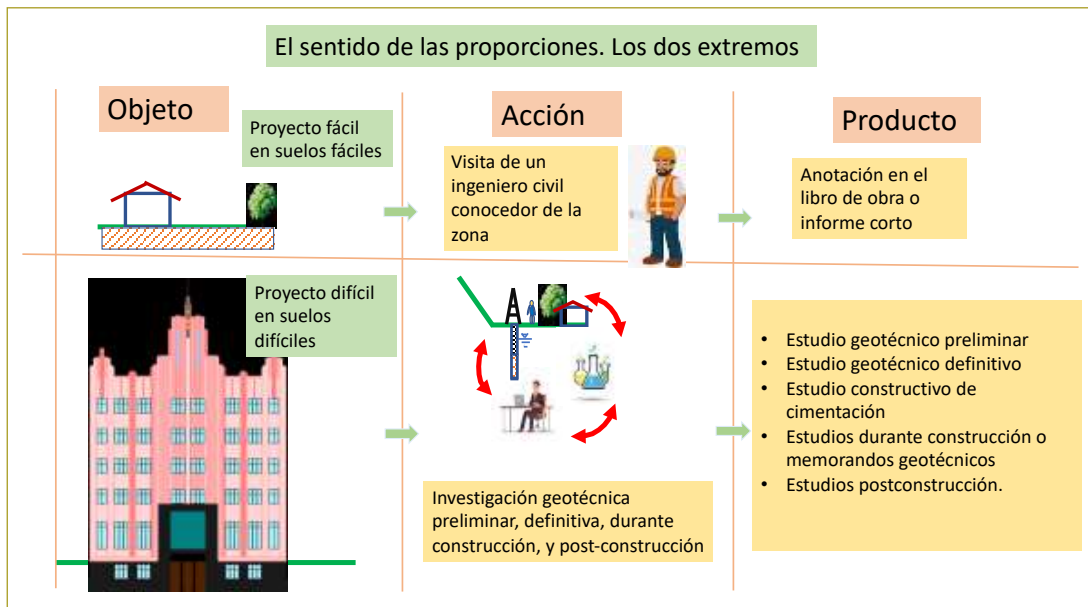


Figura 3.
Complejidad vs. dificultad: el sentido de las proporciones

Fuente: Elaboración propia.

hacer tres sondeos (bien ejecutados), dos esquinas y el centro del lote, le proporciona toda la información necesaria para su estudio geotécnico.

Aquí es donde considero que hace falta la variable de uniformidad del subsuelo (que se incluía en el NSR-98 y desapareció en el NSR-10), porque si la geología y la geomorfología de la zona donde se localiza un predio me demuestran que en varios kilómetros a la redonda del predio existe la misma formación geológica, como la zona de suelos blandos de Bogotá, bastaría con un sondeo bien hecho, con un cuidadoso muestreo y varios ensayos dentro del sondeo, para conseguir toda la información relevante.

En mi opinión, el exceso de número de sondeos exigidos por norma genera un deterioro en la calidad de los sondeos, sobre todo si esa cantidad es superflua por la configuración geotécnica del suelo en el predio de estudio.

ACERCA DE LA DEFINICIÓN DE UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN

En este aspecto, la norma conduce a confusiones o divergencias. Es muy útil en la aplicación de la norma para los proyectos que la ingeniería está acometiendo, tales como los grandes proyectos de vivienda, ya que tres sondeos son claramente insuficientes en estos casos. Pero en proyectos pequeños o medianos, se pasa por alto la definición “e” de unidades de construcción (cada

fracción del proyecto con alturas, cargas o niveles de excavación diferentes), en cuyo caso, un proyecto pequeño o mediano, con varios módulos separados pero de iguales características, aunque separados por juntas o espacios, forman una sola unidad de construcción, por lo que en teoría con tres sondeos bastaría para cumplir la norma. No es muy práctico generalizar en esto porque cada proyecto y cada predio tendrá sus características particulares, y por lo tanto es correcto por lo menos tener un sondeo bajo cada construcción, lo cual también define el número de sondeos. En últimas, es esencial el criterio del ingeniero geotécnico en esta definición.

ACERCA DE LA CATEGORÍA DE LA EDIFICACIÓN

En este aspecto, se hace la recomendación de aplicar criterios de ingeniería, en vez de hacer revisiones jurídicas de la letra menuda. Un ejemplo de esto lo tuvimos hace poco con una construcción de un piso con 30 apoyos, cuyas cargas calculadas por el ingeniero estructural estaban entre 10 y 65 toneladas, pero un apoyo contaba con 84 toneladas de carga. ¿Es esto una estructura de categoría baja o media? (por lo de las 84 toneladas).

En mi opinión, la estructura clasifica como categoría baja, y la carga que sobrepasa las 80 toneladas para cambiar a categoría media se resolverá por métodos estructurales en la cimentación. Otro problema sería que si se mantiene categoría baja no sean suficientes los 6 m de profundidad que exige la norma en la pro-

fundidad de los sondeos para estructuras de categoría baja, caso en el cual el ingeniero tendrá que investigar a mayor profundidad para lograr la información necesaria para su diseño.

CONCLUSIONES

- El criterio del ingeniero geotécnico se debe considerar como un importante insumo en la interpretación y la aplicación de las normas. Estas son un mínimo, pero no pretenden suplantar la capacidad, criterio profesional y experiencia particular que tenga el ingeniero geotécnico.
- Las consideraciones sobre el comportamiento de proyectos aledaños al de estudio, las soluciones que se han dado de tiempo atrás a problemas de cimentación o de excavación de proyectos aledaños al de estudio, forman parte del criterio geotécnico que presente un consultor frente a curadurías o interventorías, y estos las deben considerar como información válida y relevante.
- La ingeniería no debe perder de vista las motivaciones que dieron lugar a las sólidas normas actuales, para poder interpretar con criterios de ingeniería la aplicación de los requisitos mínimos que hoy incluyen las normas.

Agradecimientos

- Agradezco a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería la oportunidad que nos da para expresar nuestras opiniones al respecto de las semejanzas y divergencias entre la ingeniería geotécnica y la estructural.
- Doy gracias al ingeniero Luis Guillermo Aycardi (q.e.p.d.), quien tuvo la iniciativa de organizar los encuentros de ingenieros de suelos y estructuras, y me instó en 1991 a escribir y presentar ante los asistentes a ese primer encuentro el trabajo “Afectación a construcciones vecinas”, tema propuesto por él mismo y que acogí y presenté con entusiasmo.

Autoría

La autoría del presente artículo es de exclusiva creación del suscrito, ingeniero Héctor Eduardo Parra Ferro.

REFERENCIAS

- Ministerio de Desarrollo Económico (1998). *Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-98)*. Comisión Asesora Permanente del Régimen de Construcciones Sismo Resistentes.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Parra, H. (1991, 4-6 de septiembre). “Afectación a construcciones vecinas”. Primer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros, Comisión de Geotecnia (1990). *Código Colombiano de Geotecnia, primera etapa. VI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. SCL.



Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas parcialmente saturados

Bearing capacity of shallow foundations in partially saturated volcanic ash soils

CATALINA LOZADA LÓPEZ¹ - CRISTHIAN CAMILO MENDOZA BOLAÑOS² -
HERMES ARIEL VACCA GÁMEZ³ - ESTEBAN GUACANEME⁴

1. Doctora en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7630-1710>.

2. Doctor en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2888-6507>.

3. Doctor en Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3159-6997>.

4. Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Geotecnia. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0075-3101>.

catalinalozadal@javeriana.edu.co - cmendozab@unal.edu.co - vacca@javeriana.edu.co
- guacamene.esteban@javeriana.edu.co

Recibido: 02/02/2025 Aceptado: 15/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se evalúa la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas en condiciones de saturación parcial, incorporando explícitamente el efecto de la succión matricial en el comportamiento mecánico del suelo. A partir de resultados experimentales y del análisis de parámetros geotécnicos relevantes, se examina la influencia del grado de saturación en la resistencia al corte y en la capacidad portante última de zapatas superficiales.

En el estudio se comparan las condiciones saturadas y parcialmente saturadas, evidenciando incrementos significativos en la capacidad portante asociados a la presencia de succión, así como variaciones en los mecanismos de falla. Los resultados obtenidos permiten resaltar la importancia de considerar el estado de saturación real del suelo en el diseño geotécnico, particularmente en depósitos de origen volcánico, donde las condiciones no saturadas son frecuentes.

En el trabajo se aportan elementos técnicos que contribuyen a una evaluación más realista y segura del desempeño de cimentaciones superficiales en este tipo de materiales.

Palabras claves: Suelos derivados de cenizas volcánicas, suelos parcialmente saturados, capacidad portante, cimentaciones superficiales, succión matricial.

Abstract

This article evaluates the bearing capacity of shallow foundations in soils derived from volcanic ash under conditions of partial saturation, explicitly incorporating the effect of matrix suction on the mechanical behavior of the soil. Based on experimental results and the analysis of relevant geotechnical parameters, the influence of the degree of saturation on the shear strength and ultimate bearing capacity of shallow footings is examined.

The study compares saturated and partially saturated conditions, showing significant increases in bearing capacity associated with the presence of suction, as well as variations in failure mechanisms. The results highlight the importance of considering the actual saturation state of the soil in geotechnical design, particularly in deposits of volcanic origin, where unsaturated conditions are common.

The work provides technical elements that contribute to a more realistic and reliable assessment of the performance of shallow foundations in this type of material.

Keywords: Soils derived from volcanic ash, partially saturated soils, bearing capacity, shallow foundations, matrix suction.

INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con vastas zonas geológicas que albergan depósitos de suelos complejos, como los derivados de ceniza volcánica, sobre los cuales se han desarrollado asentamientos humanos, infraestructuras industriales y centros gubernamentales (Mendoza et al., 2021). El estudio de estos suelos es desafiante debido a que su comportamiento mecánico y dinámico varía según los procesos de formación, además de que presentan problemas de inestabilidad de taludes, alta sensibilidad y agrietamiento (Hernández et al., 2018). En particular, las condiciones climáticas tropicales de Colombia influyen en los procesos de transferencia de calor y vapor de agua en el interior del suelo. En condiciones secas, el flujo de agua es ascendente, lo que produce una pérdida de humedad y genera cambios en el volumen y en la resistencia al corte del suelo; por el contrario, en periodos húmedos se pierde resistencia al disminuir el contenido de humedad a causa del incremento de la succión.

En varias investigaciones experimentales se ha demostrado que la succión y la cementación desempeñan un papel clave en el aumento de la resistencia del suelo (Delage y Cui, 1996; Pereira et al., 2005; Caicedo et al., 2014). A pesar de la relevancia de estudiar estos suelos, existen pocas investigaciones acerca de la respuesta esfuerzo-deformación y el comportamiento parcialmente saturado de los depósitos de ceniza volcánica, dado que constituyen menos del 1 % de los suelos en el mundo (Lizcano et al., 2006).

Recientemente, se ha estudiado la capacidad portante teórica de las cimentaciones superficiales en suelos no saturados (Oh y Vanapalli, 2008; Vanapalli y Mohamed, 2013; Lozada et al., 2019). En estos estudios se concluye que la capacidad portante del suelo aumenta a medida que lo hacen los parámetros de resistencia al corte, los cuales, en suelos parcialmente saturados, dependen de la succión matricial.

El objetivo de este trabajo es determinar el incremento de la capacidad portante teórica en suelos derivados de ceniza volcánica en condiciones de parcial saturación, mediante la determinación de los parámetros de resistencia al corte por medio de ensayos de laboratorio.

Así mismo, en este estudio se busca llenar el vacío existente en la bibliografía científica sobre los efectos que ocurren en suelos derivados de ceniza volcánica, los cuales no se comprenden completamente en la actualidad.

INTRODUCTION

Colombia has extensive geological regions composed of complex soil deposits, such as those derived from volcanic ash, where human settlements, industrial infrastructure, and governmental facilities have been developed (Mendoza et al., 2021). The study of these soils is challenging because their mechanical and dynamic behavior varies according to their formation processes. In addition, they often present problems related to slope instability, high sensitivity, and cracking (Hernández et al., 2018).

In particular, the tropical climatic conditions of Colombia influence the processes of heat and water vapor transfer within the soil. Under dry conditions, water flow tends to move upward, causing moisture loss and changes in soil volume and shear strength. Conversely, during wet periods, soil strength decreases as moisture content increases and matric suction is reduced.

Several experimental studies have shown that suction and cementation play a key role in increasing soil strength (Delage and Cui, 1996; Pereira et al., 2005; Caicedo et al., 2014). Despite the importance of studying these soils, there is still limited research on the stress-strain response and partially saturated behavior of volcanic ash deposits, as they represent less than 1% of the world's soils (Lizcano et al., 2006).

In recent years, the theoretical bearing capacity of shallow foundations in unsaturated soils has been studied (Oh and Vanapalli, 2008; Vanapalli and Mohamed, 2013; Lozada et al., 2019). These studies conclude that the bearing capacity of soil increases as shear strength parameters increase, which in partially saturated soils depend on matric suction.

The objective of this study is to determine the increase in the theoretical bearing capacity of volcanic ash soils under partially saturated conditions by estimating shear strength parameters through laboratory testing.

Furthermore, this research seeks to contribute to filling the gap in the scientific literature regarding the behavior of soils derived from volcanic ash, whose mechanisms are still not fully understood.

METODOLOGÍA

El suelo utilizado en esta investigación corresponde a un suelo derivado de ceniza volcánica obtenido en la ciudad de Manizales (Colombia), a una profundidad

de 1,5 m, el cual se clasifica en el sistema SUCS como un limo de alta plasticidad MH (tabla 1). Los límites de plasticidad obtenidos y la clasificación coinciden con los reportados en la bibliografía para suelos cuya composición mineralógica corresponde principalmente a mineral de tipo haloisita (Vásquez-Varela y Mendoza, 2021). En la figura siguiente (figura 1), obtenida mediante microscopia SEM, se muestra la morfología tubular cilíndrica del mineral haloisita presente en las muestras de suelo analizadas.

La curva de distribución del tamaño de partículas se obtuvo empleando el Masterseizer 2000, expresada en porcentaje de volumen acumulado (figura 2). De esta curva se deriva que el 2 % corresponde a la fracción arcillosa ($d < 0,002$ mm), el 54 % a la fracción limosa ($0,002$ mm $< d < 0,06$ mm) y el 44 % a la fracción arenosa ($d > 0,06$ mm). La distribución de tamaños obtenida se encuentra dentro del rango de los suelos derivados de cenizas volcánicas previamente reportados en la ciudad de Manizales para diferentes profundidades (Herrera et al., 2007).

Tabla 1

Propiedades del suelo derivado de ceniza volcánica obtenido de Manizales (Colombia)

Propiedad	Valor	Unidad
Límite líquido (w_L)	74	%
Límite plástico (w_p)	37	%
Índice de plasticidad (IP)	37	%
Gravedad específica (G_s)	2,08	-

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

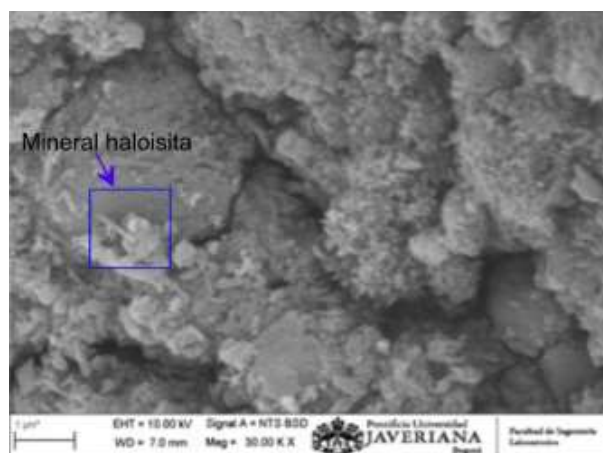


Figura 1. Imagen SEM de un suelo derivado de ceniza volcánica en Manizales (Colombia)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

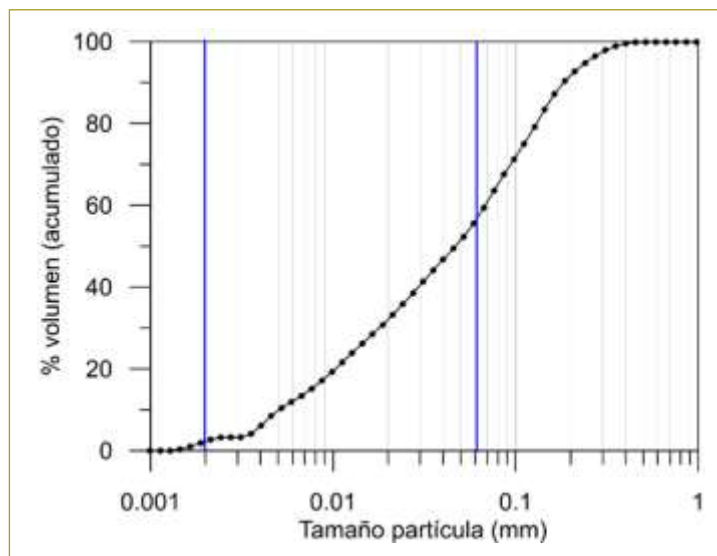


Figura 2. Curva de distribución de tamaño de partículas (Mastersizer 2000)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

Se hicieron ensayos de corte simple en el equipo Direct Shear Test Track II en la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Las muestras de suelo se prepararon secándolas al aire y llevándolas a un contenido de humedad $w_{opt} = 44,5$ %, correspondiente a la densidad óptima obtenida en el ensayo de compactación Proctor estándar $\gamma_d = 10,5$ kN/m³. Se efectuaron ensayos saturando la muestra después de la compactación y ensayos en muestras secadas al aire después de la compactación inicial. Durante la ejecución de los ensayos, no se hicieron el control ni la medición de la succión del suelo.

A continuación se presentan los ensayos de corte simple efectuados para tres valores de esfuerzo normal aplicado (tabla 2). Para las muestras parcialmente saturadas, el valor de succión inicial se obtiene a partir de la curva de retención de agua del suelo, realizada por Herrera et al. (2007) para muestras de suelo tomadas en la ciudad de Manizales. Las características mineralógicas de estos tipos de suelos resultan en una gran capacidad de retención de agua en el suelo, lo que evidencia que para una diferencia en el contenido de humedad de 21 % se obtienen 400 kPa de succión matricial (tabla 2).

Tabla 2
Ensayos de corte simple

Ensayo	Esfuerzo normal σ'_n (kPa)	Contenido de humedad inicial w_o (%)	Succión matricial s (kPa)
ISS-50-100-200	50, 100, 200	47,0	0
ISW-50-100-200	50, 100, 200	26,4	400

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb obtenida para las muestras analizadas con diferente nivel de succión matricial se presenta en la figura siguiente (figura 3, parte a), en la que se evidencia que la resistencia al corte del suelo aumenta al incrementarse la succión. Este efecto se explica por medio del criterio de falla de Mohr-Coulomb extendido, el cual permite considerar el efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados en el cálculo de la resistencia al corte (Fredlund, 1979). En este criterio, se introduce un eje adicional que incluye la succión matricial. Los puntos ubicados en el espacio de esfuerzo normal, succión y resistencia última se encuentran sobre una envolvente de resistencia, la cual se puede determinar en términos de esfuerzos totales o efectivos (Fredlund, 1978).

El ángulo de fricción interna del suelo obtenido para el suelo saturado es $\varphi' = 44,73^\circ$, y para el suelo

parcialmente saturado, $\varphi' = 43,88^\circ$. En la muestra saturada, el suelo no presenta valor de cohesión, mientras que, en la condición parcialmente saturada, el valor de la cohesión es 20,6 kPa.

Estos valores son consistentes con los ángulos de fricción reportados en la bibliografía, los cuales pueden estar entre 26° y 43° (Forero et al., 1999). Los valores elevados del ángulo de fricción son característicos de estos materiales, a pesar de presentar un alto valor de límite líquido y minerales arcillosos.

Adicionalmente, en ensayos de corte directo realizados con suelos derivados de cenizas volcánicas en Chile (Sepúlveda et al., 2016), se han obtenido ángulos de fricción de 47° para condiciones saturadas en muestras alteradas, similares a los obtenidos en muestras inalteradas. Los valores de cohesión para las muestras saturadas en estos suelos son 17 kPa para las muestras saturadas inalteradas y 8 kPa para las muestras alteradas. En suelos parcialmente saturados, el ángulo de fricción obtenido en las muestras saturadas y parcialmente saturadas es similar, con rangos entre 38° y 47° .

A continuación se presenta la envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb en materia de esfuerzos efectivos, donde la pendiente de la curva en el espacio succión y resistencia al corte se denomina φ^b . De los ensayos efectuados, se obtuvo un valor $\varphi^b = 1,1$ para σ'_n de 50 kPa y φ^b promedio de $11,2^\circ$ para σ'_n de 100 y 200 kPa (figura 3, parte b).

La ecuación que permite determinar la resistencia al corte del suelo en términos de esfuerzos efectivos, considerando la succión del suelo, es la propuesta por Vanapalli y Vanapalli (1996):

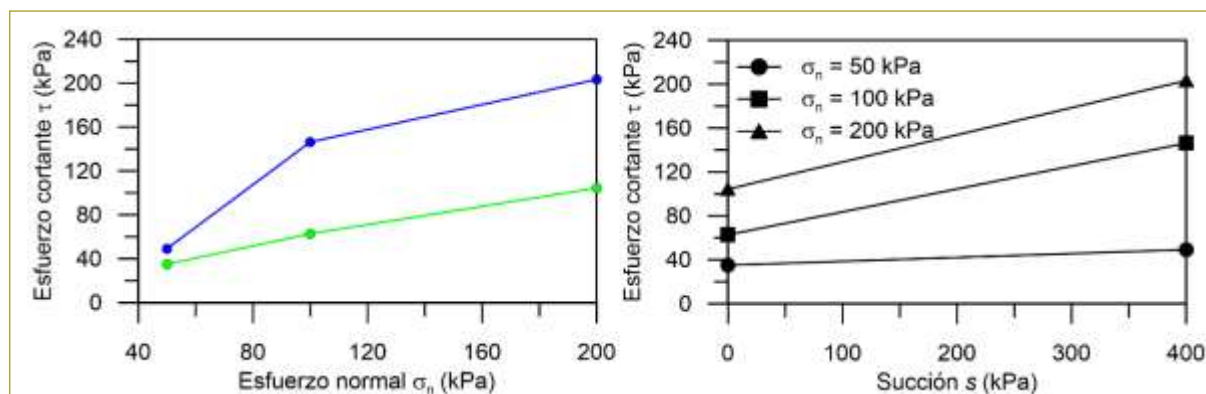


Figura 3. Resistencia al corte del suelo. a) Criterio de falla de Mohr-Coulomb. b) Criterio de falla extendido de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b$$

Donde:

φ' : ángulo de fricción interna.

c' : cohesión efectiva.

φ^b : ángulo de cambio de resistencia al corte con respecto a la succión matricial.

u_a : presión del aire.

$(u_a - u_w)$: succión matricial.

Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos no saturados

La capacidad portante teórica de cimentaciones superficiales en suelos no saturados ha sido objeto de estudio reciente por varios autores (Oh y Vanapalli 2008; Vanapalli y Mohamed 2013). La ecuación propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007) es una aproximación planteada en términos de esfuerzos efectivos. Para el análisis de resistencia a corto plazo, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$q_u = (S_u + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b) N_c$$

Donde S_u es la resistencia al corte no drenado, $(u_a - u_w)_f$ es la succión final obtenida de la curva de retención de humedad (SWCC) y $N_c = 5,14$ es el factor de capacidad portante.

Para simular el efecto de la succión en la capacidad portante de una cimentación superficial, se hicieron cálculos teóricos de capacidad portante para las muestras de suelo ISS, IO y ISW, sometidas al proceso de desecación mencionado previamente. Los cálculos se efectuaron utilizando la ecuación (2). Considerando un valor de $S_u = 70$ kPa (Mendoza, 2021) para una condición saturada se obtiene la resistencia última del suelo, incluyendo el efecto de la succión.

A renglón seguido se muestra la variación de la capacidad portante del suelo para una cimentación superficial cuadrada. Se evidencia un incremento del 51,4 % de la capacidad portante en el suelo del ensayo ISW, comparado con las muestras ISS (tabla 3).

Tabla 3

Capacidad portante de una cimentación superficial considerando el efecto de la succión

Ensayo	Succión matricial s (kPa)	Capacidad portante q_u (kPa)
ISS-50-100-200	0	359,8
ISW-50-100-200	400	544,7

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

CONCLUSIONES

Los suelos derivados de cenizas volcánicas están ampliamente presentes en el territorio colombiano. A pesar de esto y de la complejidad en su comportamiento, los estudios relacionados en los que se considera el efecto de la succión son limitados. En la investigación realizada, se llevaron a cabo ensayos de corte simple en muestras de suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia, sometidas a diferentes niveles de succión. Como resultado, se obtienen las siguientes conclusiones principales:

- Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan un tamaño de partículas que los clasifica como suelos finos; sin embargo, se caracterizan por tener ángulos de fricción elevados. En los ensayos hechos no se observó una variación significativa del ángulo de fricción con respecto al incremento de la succión matricial. No obstante, se determinó un ángulo de fricción $\varphi_b = 11,2^\circ$ debido al efecto de la succión para valores de esfuerzos normales superiores a 50 kPa.
- Las características de retención de agua de estos suelos generan que los cambios en el contenido de humedad ocasionen variaciones considerables en la succión. Como resultado de esto, la capacidad portante de una cimentación superficial aumenta en un 51,4 % a causa del incremento de la succión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, por financiar esta investigación mediante el proyecto de la Facultad de Ingeniería ID 21344, denominado “Estudio de cargas cíclicas en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia”.

Autoría

C. Lozada se encargó de la redacción del documento técnico y diseñó el modelo de análisis utilizado.

C. Mendoza contribuyó a la redacción del documento técnico y al diseño del modelo de análisis empleado.

H. Vacca ayudó con el análisis técnico de resultado y consultante en ensayos de laboratorio.

E. Guacaneme proporcionó los ensayos de laboratorio.

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación con este artículo.

REFERENCIAS

- Caicedo, B., Tristanco, J., Thorel, L., y Leroueil, S. (2014). Experimental and analytical framework for modelling soil compaction. *Engineering Geology*, 175, 22-34.
- Delage, P., y Cui, Y. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), 291-311. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>
- Forero-Dueñas, C., Gálvez, E., Fino, W., y Ulloa, E. (1999). Estudios de la estructura de las cenizas volcánicas de Armenia y su relación con el comportamiento geotécnico. *X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Boletín Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia*.
- Fredlund, D. G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 121-139.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., y Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- Hernández, O., Cordão Neto, M. P., y Caicedo, B. (2018). Structural features and hydro-mechanical behaviour of a compacted andesitic volcanic soil. *Geotechnical Letters*, 8(3), 195-200. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00056>
- Herrera, M. C., Lizcano, A., y Santamarina, J. C. (2007). Colombian volcanic ash soils [datos no completos para cita formal].
- Lizcano, A., Herrera, M. C., y Santamarina, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia [volcanic ash soils in Colombia]. *Accidente e Infraestructura Civil*, 6(2), 167.
- Lozada, C., Thorel, L., y Caicedo, B. (2019). Bearing capacity of circular footings resting on unsaturated desiccated soils. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(3), 154-166.
- Mendoza, C., Ramos, R. A., y Calle, O. C. (2021). Seismic evaluation of a profile of volcanic ash from the South American Andes. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 12(1), 40-60. <https://doi.org/10.4018/IJGEE.2021010104>
- Oh, W. T., y Vanapalli, S. K. (2008). Modelling the stress versus settlement behavior of model footings in saturated and unsaturated sandy soils. *Proceedings*, 1-6 [falta nombre de congreso o revista].
- Pereira, J. H., Fredlund, D. G., Cardão Neto, M. P., y Gitirana, G. F. (2005). Hydraulic behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1264-1273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1264))
- Sepúlveda, S. A., Petley, D. N., Brain, M. J., y Tunstall, N. (2016). The effect of dynamic loading on the shear strength of pyroclastic ash deposits and implications for landslide hazard: the case of Pudahuel Ignimbrite, Chile. *Engineering Geology*, 205, 54-61.
- Vanapalli, S. K., y Mohamed, F. M. O. (2013). Bearing capacity and settlement of footings in unsaturated sands. *International Journal of Geomate*, 5(1), 595-604.
- Vanapalli, S. K., y Vanapalli, W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379-392.
- Vanapalli, S., y Fredlund, D. G. (2007). Mechanics of unsaturated soils for the design of foundation structures. *Conference Engineering Mechanics Structures* (pp. 363-377).
- Vanapalli, S., y Oh, W. (2008). Modeling the stress versus settlement behavior of model footings in saturated and unsaturated sandy soils. *Geotechnical Letters*, 1, 1-6.
- Vásquez-Varela, L. R., y Mendoza, C. (2021, November). Implications of physical and chemical changes in volcanic ash soils related to road construction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2118(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2118/1/012012>



Uso innovador de geosintéticos en columnas encamisadas con geotextil para cimentaciones en diques sobre suelos blandos

Innovative use of geosynthetics in geotextile-clad columns for foundations in dikes on soft soils

CARLOS MAURICIO RODRÍGUEZ GUEVARA¹ - LIZETH ARDILA MOLINA²

1. MSSCE. Geotechnical Engineering, MIC Civil. HUESKER Group. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6648-4218>.

2. Máster en Geotecnia. Máster en Infraestructura Civil. HUESKER Group. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-7413>.

crodriguez@huesker.com - Lizeth.ardila@HUESKER.com.br

Recibido: 15/02/2025 Aceptado: 27/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza el uso de columnas encamisadas con geotextil como una solución innovadora para el mejoramiento del terreno en suelos muy blandos, con aplicación particular en obras de infraestructura lineal y de contención. Se describen los principios de funcionamiento del sistema, el papel del geosintético en la confinación del material granular y los criterios generales de diseño que gobiernan su comportamiento mecánico. A partir de un caso de estudio representativo, se evalúa el desempeño de esta técnica en materia de estabilidad global, control de asentamientos y capacidad portante, considerando condiciones reales de carga y construcción.

Los resultados evidencian que las columnas encamisadas con geotextil constituyen una opción eficiente y sostenible frente a métodos tradicionales de mejoramiento del suelo, especialmente en contextos en los que se requiere minimizar deformaciones y optimizar los procesos constructivos.

El trabajo aporta una visión aplicada basada en la experiencia profesional, relevante para el diseño y la ejecución de soluciones geotécnicas en suelos de baja resistencia.

Palabras claves: geosintéticos, columnas encamisadas con geotextil, mejoramiento del terreno, suelos blandos y cimentaciones especiales.

Abstract

This article analyzes the use of geotextile-encased columns as an innovative solution for soil improvement in very soft soils, with application in linear and retaining infrastructure works. The operating principles of the system, the role of geosynthetics in confining granular material, and the general design criteria governing its mechanical behavior are described. Based on a representative case study, the performance of this technique is evaluated in terms of overall stability, settlement control, and bearing capacity, considering actual load and construction conditions.

The results show that geotextile-encased columns are an efficient and sustainable alternative to traditional soil improvement methods, especially in contexts where deformation must be minimized and construction processes optimized.

The work provides an applied vision based on professional experience, relevant to the design and execution of geotechnical solutions in low-strength soils.

Keywords: geosynthetics, geotextile-encased columns, soil improvement, soft soils, special foundations.

INTRODUCCIÓN

El sistema de cimentación con columnas encamisadas con geotextil (GEC, por su sigla en inglés) se desarrolló específicamente para estructuras de terraplén construidas sobre suelos de muy baja resistencia. Este sistema se compone de columnas dispuestas uniformemente, conformadas por material granular no cohesivo y encapsuladas en una funda geosintética tejida en forma circular, que permite la transmisión de las cargas estructurales hacia el estrato de soporte.

Las cargas globales y las concentraciones de esfuerzo sobre las cabezas de las columnas inducen esfuerzos horizontales radiales dirigidos hacia el exterior. La particularidad del sistema GEC radica en que estos esfuerzos no solamente son contrarrestados por la presión interna ejercida por el suelo blando circundante, sino también —y de manera más relevante— por la resistencia radial proporcionada por la funda geotextil de alta rigidez a tracción. Las fuerzas circunferenciales de tracción generadas en el geotextil de encamisado brindan soporte radial a las columnas y garantizan el equilibrio del sistema, lo que permite su uso incluso en suelos extremadamente blandos, turbas y lodos con soporte radial despreciable ($S_u < 2 \text{ kPa}$ (figura 1).

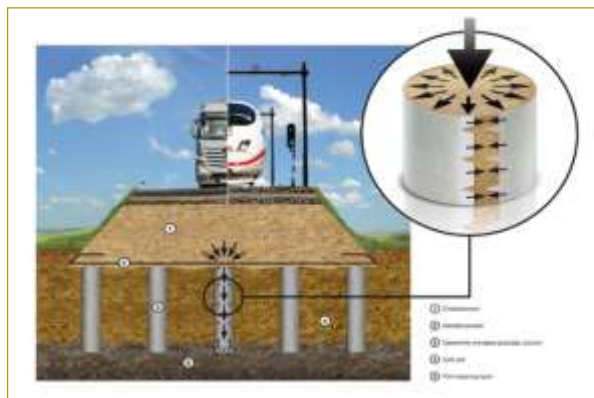


Figura 1. Sección transversal de GEC

Fuente: Figura adaptada de material técnico de Huesker Geosynthetics (2020).

La movilización de las fuerzas anulares requiere una cierta deformación radial de la encamisada (por lo general, en el rango de 2 a 5 % de deformación), lo que provoca una ligera expansión radial de las columnas granulares y, en consecuencia, un asentamiento vertical en la parte superior de la columna; por lo tanto, el sistema GEC no es completamente libre de asentamientos.

Sin embargo, la mayor parte del asentamiento ocurre durante la etapa de construcción y se compensa con un incremento en la altura del terraplén. Finalmente, se alcanza un estado de equilibrio, garantizado por la resistencia y rigidez del material granular, la contrapresión radial del suelo blando y la fuerza anular de confinamiento ejercida por el geotextil de encamisado.

Las columnas GEC suelen disponerse en un patrón de malla triangular. Los diámetros típicos de las columnas son de 600 mm u 800 mm, con una separación axial de entre 1,7 m y 2,4 m, lo que resulta en una proporción de tratamiento del terreno que oscila entre el 10 % y el 20 % del área intervenida.

La disposición de las columnas encamisadas con geotextil genera un sistema de cimentación dúctil, inmune al pandeo bajo las cargas aplicadas sobre las columnas. El empleo de GEC ayuda a reducir significativamente tanto los asentamientos absolutos como diferenciales, al tiempo que mejora la estabilidad estructural durante la construcción y en la fase de servicio. Además, dado que las columnas actúan como megadrenes con estabilidad frente a la filtración, aceleran el proceso de asentamiento y consolidación. Los asentamientos posteriores, por ejemplo, los inducidos por cargas de tráfico, son bajos y se pueden compensar, si es necesario, mediante la adición temporal de sobrecarga.

INTRODUCTION

The geotextile-encased column (GEC) foundation system was developed specifically for embankment structures constructed on soils with very low strength. This system consists of uniformly spaced columns made of non-cohesive granular material and encapsulated within a circular woven geosynthetic sleeve, which allows structural loads to be transmitted to the supporting strata.

The global loads and stress concentrations acting on the column heads induce outward radial horizontal stresses. The distinctive feature of the GEC system is that these stresses are resisted not only by the internal pressure exerted by the surrounding soft soil but also more importantly by the radial resistance provided by the high tensile strength geotextile sleeve. The circumferential tensile forces developed in the casing geotextile provide radial confinement to the columns and ensure system equilibrium, allowing the technique to be used even in

extremely soft soils, peat, and mud with negligible radial support ($S_u < 2 \text{ kPa}$, see Figure 1).

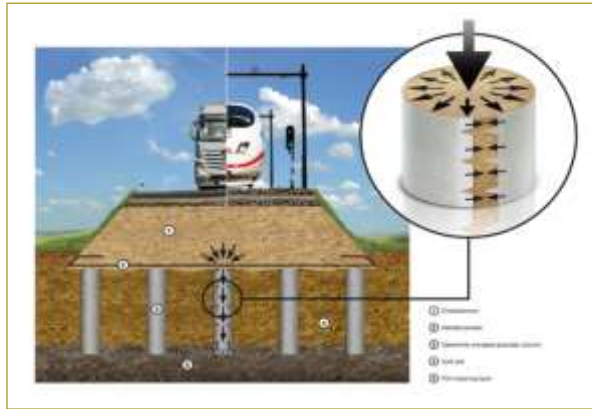


Figure 1. Cross section of GEC

The mobilization of the circumferential tensile forces requires a certain radial deformation of the casing (usually between 2% and 5%), which produces a slight radial expansion of the granular columns and, consequently, vertical settlement at the column head. Therefore, the GEC system is not completely settlement-free. However, most of the settlement occurs during the construction stage and is typically compensated by increasing the height of the embankment. Ultimately, an equilibrium state is reached, governed by the strength and stiffness of the granular material, the radial counterpressure of the soft soil, and the circumferential confinement force exerted by the casing geotextile.

GEC columns are generally arranged in a triangular grid pattern. Typical column diameters are 600 mm or 800 mm, with center-to-center spacing between 1.7 m and 2.4 m, resulting in a soil treatment ratio ranging from approximately 10% to 20% of the treated area.

The arrangement of geotextile-encased columns forms a ductile foundation system that is resistant to buckling under the loads applied to the columns. The use of GEC significantly reduces both total and differential settlements while improving structural stability during construction and service conditions. In addition, because the columns act as large vertical drains with filtration stability, they accelerate settlement and consolidation processes. Subsequent settlements, such as those induced by traffic loads, are generally small and can be compensated, if necessary, by temporarily applying additional load.

BASES DEL DISEÑO

A lo largo de los años, se han desarrollado diversos métodos para el diseño y cálculo de columnas encamisadas con geotextil (GEC); en la actualidad, se dispone tanto de procedimientos analíticos como de soluciones numéricas. Van Impe (1989) propuso los primeros enfoques en el cálculo, mientras que Raithel (1999) y Raithel y Kempfert (2000) desarrollaron posteriormente modelos analíticos más precisos y soluciones numéricas.

Raithel (1999) presentó un procedimiento analítico de diseño, basado en métodos previos de compactación por desplazamiento vibratorio desarrollados por Priebe (1995) y Ghionna y Jamiolkowski (1981). Los procedimientos de Raithel incluyen una fuerza de confinamiento en la dirección anular del encamisado, basada no solo en la resistencia a la tracción última (“fuerza”), sino en el comportamiento completo de esfuerzo-deformación del geosintético, definido por el módulo de rigidez a tracción J [kN/m]. Como resultado de esto, a partir de la deformación anular es posible calcular la expansión radial de la GEC y el asentamiento vertical resultante en la parte superior de la columna, el cual será equivalente al asentamiento promedio del terraplén (para más detalles sobre el procedimiento de diseño, se recomienda revisar Raithel [1999]).

Vale la pena destacar que el comportamiento esfuerzo-deformación del encamisado es el elemento clave para el desempeño del sistema. En numerosos proyectos, mediciones *in situ* han confirmado la validez y aplicabilidad de este método de diseño.

El comportamiento portante de las GEC es complejo. Estos elementos son más rígidos que el suelo circundante y, por consiguiente, atraen una mayor concentración de carga proveniente del terraplén; a su vez, la presión sobre el suelo adyacente disminuye, lo que conlleva una reducción general en los asentamientos totales. El procedimiento de diseño se basa en el concepto de unidad de celda (figura 2). La tensión vertical promedio producida por el terraplén (σ_0) actúa sobre el área hexagonal de influencia de una columna individual (AE). Esta tensión se distribuye en la tensión más alta impuesta sobre la columna ($\sigma_{v,c}$) al actuar en el área de la columna (AC), y en la tensión vertical menor ($\sigma_{v,s}$), que actúa sobre el área del suelo adyacente (AE-AC).

La diferencia de tensiones verticales entre la columna ($\sigma_{v,c}$) y el suelo adyacente ($\sigma_{v,s}$) genera una diferencia en los esfuerzos radiales horizontales (σ_h) tanto en la

columna como en el suelo circundante, la cual induce una fuerza de tracción en anillo dentro del geotextil de encamisado, que compensa el déficit de fuerza en el sistema para alcanzar el equilibrio. La magnitud de esta fuerza de confinamiento depende no solo de los esfuerzos horizontales y sus diferencias, sino también de las deformaciones por medio del módulo de tracción en anillo J . De hecho, esta dependencia de la deformación con el equilibrio es una característica particular del sistema y del procedimiento de diseño correspondiente.

A causa de este comportamiento interactivo complejo, los procedimientos de cálculo son iterativos y requieren el empleo de software computacional para alcanzar el estado de equilibrio final del sistema.

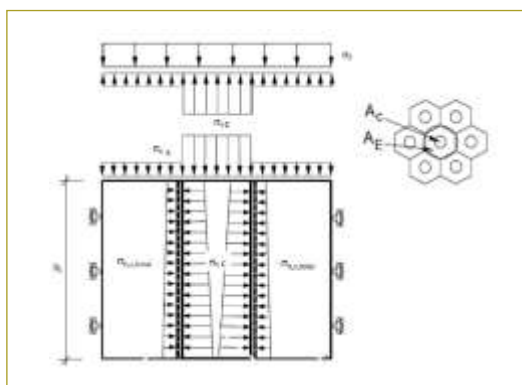


Figura 2. Representación del modelo analítico de la unidad de celda

Fuente: Adaptado de Ebge. *Recomendaciones para el diseño y análisis de estructuras de tierra reforzadas con geosintéticos* (Sociedad Alemana de Geotecnia, DGGT).

CASO DE ESTUDIO: AMPLIACIÓN DE PLANTA EADS BAJO RECLAMACIÓN DEL TERRENO EN HAMBURGO-FINKENWERDER (ALEMANIA)

La mayoría de los proyectos en los que se ha utilizado el sistema de columnas encamisadas con geotextil (GEC) corresponden a la construcción de carreteras y ferrocarriles. No obstante, también se han implementado en proyectos de infraestructura hidráulica de gran envergadura, como la cimentación de un terraplén en un embalse sometido a actividad sísmica en Turquía (Guler y Detert, 2020). Sin embargo, el proyecto más reconocido en el que se ha empleado esta tecnología es la ampliación del área de producción de EADS en Hamburgo-Finkenwerder, el cual se describe en detalle a continuación.

En el marco de la cooperación europea para la producción del Airbus A380, fue necesario expandir las instalaciones existentes en Hamburgo mediante un proceso de recuperación de tierras. Para esto, se delimitó un área de aproximadamente 140 ha mediante la construcción de un dique de 2,4 km de longitud, relleno después hidráulicamente (figura 4).

El dique se tuvo que construir sobre suelos extremadamente blandos, con espesores de capa que oscilaban entre 4 y 14 m antes de alcanzar un estrato portante competente. Para la cimentación del dique se implementó el sistema GEC, que permitió instalar unas 60.000 columnas encamisadas con geotextil, con un diámetro de 80 cm, bajo la base del dique.

Además de actuar como elemento de confinamiento para la recuperación de tierras, el dique desempeña una función clave como barrera de protección hidráulica de la instalación de producción. Así mismo, se emplearon otras 10.000 columnas encamisadas para la reubicación de un dique existente.

A renglón seguido se muestra en qué condiciones estaba el suelo en el sitio del proyecto (figura 3).

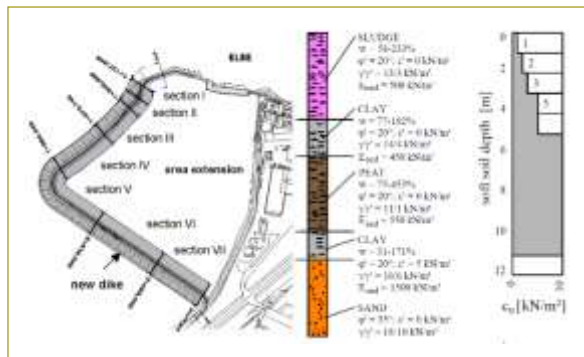


Figura 3. Concepto de recuperación de tierras mediante la construcción de un dique y condiciones geotécnicas típicas del suelo

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH, Kassel, Alemania.

En total, se instalaron siete secciones transversales de medición para evaluar las variaciones en las condiciones del suelo. Mediante varios dispositivos, se monitorearon las presiones del suelo y del agua, así como el comportamiento de deformación tanto horizontal como vertical. En la figura siguiente se muestran los asentamientos del dique (figura 4). Gracias al sistema de cimentación con columnas encamisadas con geotextil (GEC), fue posible

construir el dique en un periodo de nueve meses, con una altura de 7 m para proporcionar protección contra inundaciones. En un plazo de quince meses, se elevó el dique a su altura final —de aproximadamente 10 m— y se lo recubrió con arcilla orgánica.

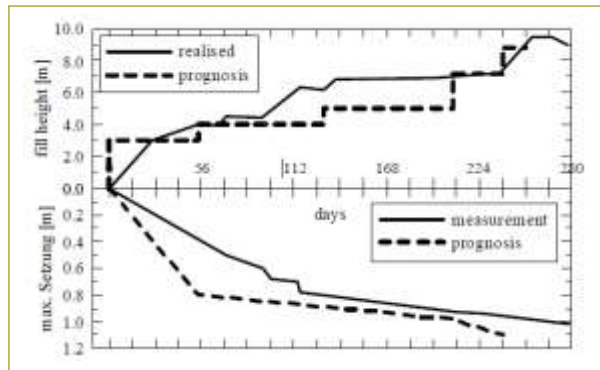


Figura 4. Resultados de los asentamientos

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH. Kassel, Alemania.

El dique reubicado, denominado Finkenwerder Vordeich, se cimentó parcialmente con GEC, mientras que el resto se realizó mediante drenes verticales prefabricados (PVD). A renglón seguido se presentan las mediciones de asentamiento en esta sección, en las que se puede observar con claridad, a partir de la magnitud de los asentamientos, qué sección se cimentó con GEC y cuál con PVD. Vale la pena señalar que el espesor de la capa de suelo blando en el área de GEC era de aproximadamente 7 m, mientras que en la zona de PVD era de 4,5 m.

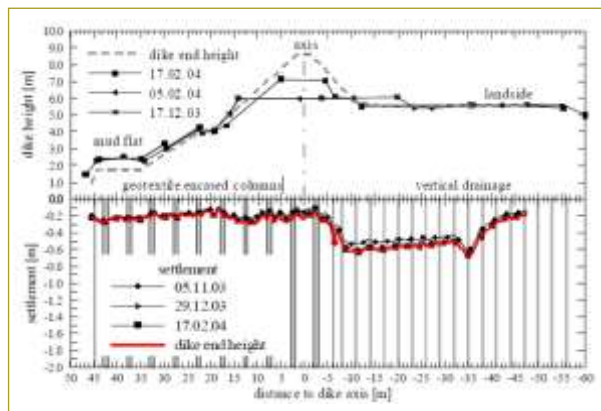


Figura 5. Resultados de los asentamientos a lo largo del dique

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH. Kassel, Alemania.

La flexibilidad del sistema durante las obras de instalación, combinada con la función de drenaje de las columnas, permitió la construcción progresiva del dique en capas sucesivas (para más detalles sobre este proyecto, se recomienda consultar a Raithel et al. [2002]).

La estabilidad del dique, tanto durante las etapas de construcción como en la fase final, se calculó utilizando parámetros efectivos de resistencia al corte (ϕ' y c'), considerando el exceso de presión de poros inducido por las cargas de cada etapa constructiva. Se analizaron varios mecanismos de falla y superficies de deslizamiento mediante métodos numéricos y analíticos en 2D y 3D, tomando en cuenta la contribución a la estabilidad proporcionada por las columnas granulares encamisadas.

Esta contribución, derivada de la presión de confinamiento del encamisado y la concentración de carga sobre las columnas, se consideró por medio de parámetros geotécnicos alternativos, de acuerdo con lo propuesto por Raithel (1999). Los cálculos de diseño determinaron la necesidad de un reforzamiento basal sobre las columnas con una resistencia a la tracción entre 500 y 1000 kN/m, el cual se instaló perpendicular al eje del terraplén.

CONCLUSIONES

El proyecto de recuperación de tierras en Hamburgo-Finkenwerder, mediante la implementación del sistema de columnas encamisadas con geotextil (GEC), representa un caso único en el ámbito de la ingeniería geotécnica aplicada a infraestructuras sobre suelos extremadamente blandos.

Optimización en el uso de materiales. La implementación de GEC redujo la cantidad de materiales de cimentación y minimizó la necesidad de remplazo masivo de suelos blandos.

Ahorro significativo en costos y tiempo de construcción. El sistema permitió la construcción acelerada del dique, logrando elevarlo hasta su altura de diseño en tan solo quince meses, en comparación con métodos convencionales que requerirían plazos significativamente mayores.

Mejor desempeño estructural y estabilidad a largo plazo. La interacción entre el confinamiento geotextil, la capacidad de drenaje de las columnas y la redistribución de esfuerzos permitió alcanzar un equi-

librio estructural eficiente, reduciendo asentamientos diferenciales y asegurando la funcionalidad del dique como barrera de protección hidráulica.

En este proyecto se demuestra la viabilidad y efectividad del sistema GEC en grandes obras de infraestructura, sistema que se convierte en un referente para futuras aplicaciones en entornos con condiciones de suelo desafiante.

Autoría

Carlos Rodríguez conceptualizó y diseñó el estudio, analizó los datos y redactó el texto. El caso de estudio se basó en textos e información previamente desarrollados por Huesker GmbH.

Conflicto de intereses

El autor manifiesta que no presenta conflicto de intereses alguno en relación con esta publicación.

REFERENCIAS

- Ghionna, V., & Jamiolkowski, M. (1981). Colonne di ghiaia. X Ciclo di conferenze dedicate ai problemi di meccanica dei terreni e ingegneria delle fondazioni metodi di miglioramento dei terreni. Politecnico di Torino Ingegneria, attidell'istituto di scienza delle costruzioni, n.º 507.
- Guler, E., & Detert, O. (2020). The application of geotextile encased columns (GEC) beneath water in a highly seismic area for the construction of an up to 22 m high embankment. GeoAmericas 2020, Brazil.
- Priebe, H. (1995). Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen. *Bautechnik*, 72, 183-191.
- Raithel, M. (1999). Zum Trag-und Verformungsverhalten von geokunst stoffummantelten SandsÄ€ulen. *Schriftenreihe Geotechnik*, UniversitÄ€t Gh Kassel, Heft 6. Kassel.
- Raithel, M., & Kempfert, H.-G. (1999). Bemessung von geokunst stoffummantelten SandsÄ€ulen. *Bautechnik*, 76, Heft 11: 983-991.
- Raithel, M., & Kempfert, H.-G. (2000). Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng 2000, Melbourne.
- Raithel, M., Kempfert, H.-G., & Kirchner, A. (2002). Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils. Proceedings 7th ICG International Conference on Geosynthetics, Nice, France.



Excavación y sostenimiento en una terraza aluvial

Excavation and support on an alluvial terrace

JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL¹ - JOHAN CAMILO GARZÓN CUBIDES²

1. Ingeniero Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7809-3255>.

2. Magíster en Geotecnia. Ing. Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4048-8942>.

jose.amortegui@escuelaing.edu.co - johan.garzon-cu@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2025 Aceptado: 31/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza una intervención de excavación y sostenimiento desarrollada en una terraza aluvial, caracterizada por condiciones geotécnicas complejas, asociadas a materiales heterogéneos y actividad tectónica reciente. A partir de la descripción del proyecto y de la investigación del subsuelo, se evalúan los criterios de diseño y las estrategias de contención adoptadas para garantizar la estabilidad del terreno y el control de deformaciones durante las etapas constructivas. En el estudio se incorporan análisis de estabilidad y consideraciones sobre la secuencia de excavación, el drenaje y el manejo de cargas, y se resalta la influencia de la génesis del depósito aluvial en la respuesta del sistema suelo-estructura. Los resultados obtenidos y las observaciones hechas permiten identificar aspectos críticos para el diseño y la ejecución de excavaciones en este tipo de contextos geológicos, aportando recomendaciones prácticas, orientadas a la reducción de riesgos y al desempeño seguro de las obras.

Este artículo constituye un aporte técnico basado en experiencia aplicada, relevante para proyectos desarrollados en terrenos aluviales.

Palabras claves: terraza aluvial, excavación y sostenimiento, estabilidad de taludes, contención del terreno, ingeniería geotécnica.

Abstract

This article analyzes an excavation and shoring project carried out on an alluvial terrace characterized by complex geotechnical conditions associated with heterogeneous materials and the effects of recent tectonic activity. Based on the project description and subsoil investigation, the design criteria and containment strategies adopted to ensure ground stability and deformation control during the different construction stages are evaluated. The study incorporates stability analyses and considerations regarding the excavation sequence, drainage, and load management, highlighting the influence of the alluvial deposit's genesis on the soil-structure system's response. The results

and observations obtained allow the identification of critical aspects for the design and execution of excavations in this type of geological context, providing practical recommendations aimed at risk reduction and safe performance of the works.

The work constitutes a technical contribution based on applied experience, relevant to projects developed on alluvial terrain.

Keywords: alluvial terrace, excavation and support, slope stability, soil retention, geotechnical engineering.

INTRODUCCIÓN

La ejecución de una excavación modifica el estado inicial de esfuerzos del terreno, induciendo deformaciones que, en el caso de taludes, suelen ser más significativas en la dirección horizontal; cuando estos cambios superan la resistencia del material, se producen fenómenos de falla o deslizamiento. Las estructuras de contención tienen como objetivo restituir el equilibrio de esfuerzos y limitar las deformaciones, ya sea controlando los esfuerzos inducidos o incrementando la resistencia y la rigidez del terreno.

Para el análisis de estabilidad es fundamental conocer el estado inicial de esfuerzos, el cual depende de la génesis del terreno y de su historia tectónica. Los materiales geológicos pueden corresponder a roca, suelo o estados transicionales, con orígenes ígneos, sedimentarios o metamórficos. La meteorización de las rocas da lugar

a suelos residuales que suelen conservar rasgos estructurales heredados, los cuales influyen directamente en su respuesta mecánica.

Los suelos transportados se originan por procesos gravitacionales, glaciares, eólicos o fluviales, cada uno de los cuales genera depósitos con características geotécnicas particulares. En ambientes tectónicamente activos, los esfuerzos asociados a la deformación cortical se superponen a los gravitacionales, produciendo fracturas y pliegues que pueden persistir incluso en suelos residuales; en contraste, en materiales sedimentarios predominan los esfuerzos de origen gravitacional.

En los depósitos transportados es común la orientación preferencial de partículas, controlada por la dirección y la energía del medio de transporte, mientras que en los depósitos glaciares hay una alta compactación y una marcada heterogeneidad granulométrica, sin clasificación por tamaños; por el contrario, los depósitos aluviales muestran una diferenciación granulométrica progresiva, con disminución del tamaño y mayor redondeamiento de partículas en la dirección del flujo, además de una disposición estratificada asociada al régimen hidráulico.

La dinámica fluvial genera una alternancia de materiales gruesos en los cauces y sedimentos finos en las zonas de desbordamiento, lo que produce estratigrafías complejas con capas de distinta composición y resistencia. Esta heterogeneidad se ve reforzada por la migración lateral de los cauces, la formación de paleosuelos y la presencia de huellas de múltiples eventos de sedimentación, lo cual condiciona de manera significativa el comportamiento geotécnico del terreno.

Los abanicos aluviales, típicos de zonas de piedemonte, se forman por la pérdida de energía del flujo al cambiar la pendiente, lo que da lugar a depósitos mal clasificados y a cauces trenzados que migran lateralmente. Procesos posteriores de incisión pueden exponer estos depósitos y generar terrazas aluviales, aumentando la complejidad estratigráfica y la variabilidad mecánica del suelo.

En zonas de muy baja pendiente se desarrollan cauces meándricos y depósitos de margen, en los que predominan sedimentos finos y orgánicos de baja resistencia. La inestabilidad de las márgenes, el gradiente hidráulico y la erosión diferencial favorecen deslizamientos locales y la formación de complejos de orillares, así como cuerpos aislados de agua (“madres viejas”),

asociados a suelos blandos, altamente deformables y fácilmente erosionables.

Por último, en ambientes lacustres y pantanosos se depositan sedimentos finos mezclados con materia orgánica, que producen capas de composición variable y baja capacidad portante. Los depósitos eólicos, por su parte, se caracterizan por su alta porosidad y la preservación de formas dunares, lo que también condiciona su respuesta frente a excavaciones.

INTRODUCTION

Excavation alters the initial stress state of the ground, inducing deformations that, in the case of slopes, are usually more significant in the horizontal direction. When these changes exceed the strength of the material, failure or sliding phenomena occur. Retaining structures aim to restore the stress balance and limit deformations either by controlling the induced stresses or by increasing the strength and stiffness of the soil.

For stability analysis, it is essential to know the initial stress state, which depends on the genesis of the soil and its tectonic history. Geological materials may occur as rock, soil, or transitional states, with igneous, sedimentary, or metamorphic origins. Weathering of rocks produces residual soils that often retain inherited structural features, which directly influence their mechanical response.

Transported soils originate from gravitational, glacial, aeolian, or fluvial processes, each generating deposits with geotechnical characteristics. In tectonically active environments, stresses associated with crustal deformation overlap with gravitational stresses, producing fractures and folds that may persist even in residual soils. In contrast, gravitational stresses predominate in sedimentary materials.

In transported deposits, preferential particle orientation is common and is controlled by the direction and energy of the transport medium. In glacial deposits, high compaction and marked granulometric heterogeneity are typical, generally without clear particle-size classification. In contrast, alluvial deposits show progressive grain-size differentiation, with decreasing particle size and greater rounding in the direction of flow, as well as a stratified arrangement associated with the hydraulic regime.

River dynamics generate alternating deposits of coarse materials in channels and fine sediments in overflow areas, producing complex stratigraphies with layers of different composition and strength. This heterogeneity is reinforced by lateral channel migration, the formation of paleosols, and the presence of traces of multiple sedimentation events, all of which significantly influence the geotechnical behavior of the ground.

Alluvial fans, typical of piedmont areas, are formed when flow energy decreases due to slope changes, resulting in poorly sorted deposits and braided channels that migrate laterally. Subsequent incision processes may expose these deposits and generate alluvial terraces, increasing the stratigraphic complexity and mechanical variability of the soil.

In areas with very gentle slopes, meandering channels and floodplain deposits develop, dominated by fine organic sediments with low strength. Bank instability, hydraulic gradients, and differential erosion favor local landslides and the formation of riverbank complexes, as well as isolated water bodies (“oxbow lakes”), associated with soft, highly deformable, and easily erodible soils.

Finally, in lacustrine and marsh environments, fine sediments mixed with organic matter are deposited, forming layers of variable composition and low bearing capacity. Aeolian deposits, in contrast, are characterized by high porosity and the preservation of dune structures, which also influence their response to excavation.

DESCRIPCIÓN

En un sector del piedemonte llanero se tiene la intersección entre una tubería de transporte de hidrocarburos de 24” de diámetro, calidad API 5L X70 y 0,562” de espesor, y el proyecto de una vía de 14 m de ancho de banca. En el sitio de cruce el tubo asciende por una loma alargada, enterrado a cerca de dos metros de profundidad; la rasante de la vía, de 14 m de ancho de banca, se proyecta unos 20 a 35 m bajo el tubo. El ascenso del tubo se hace por el flanco oriental de la terraza, el cual muestra huellas de erosión intensa.

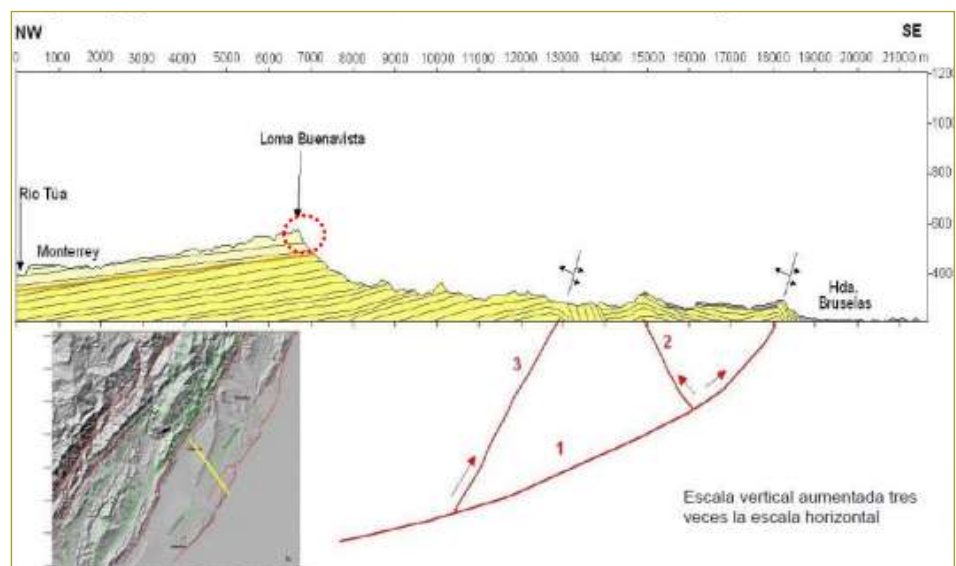
El terreno está conformado por una terraza de más de 150 m de espesor, proveniente de abanicos aluviales formados a comienzos del Cuaternario (Pleistoceno), compuesta por bloques y gravas redondeados, entrabados y de tamaño variable, entre 1 y 30 cm, así como arenas. En el sector de estudio, en los cortes de la antigua vía este material soporta taludes de hasta 50 m de altura con inclinación de 60° a 70°, respecto a la horizontal. Sin embargo, este depósito es vulnerable a la erosión y son frecuentes las cárcavas profundas, con paredes verticales. En general, las partículas que conforman el depósito aluvial están orientadas con la dimensión mayor hacia el oriente; además, por efecto tectónico la terraza se encuentra basculada entre 5 y 10° hacia el occidente.

Bajo la terraza se encuentran rocas arcillosas de la formación Caja, de edad terciaria, con buzamiento hacia el occidente.

A continuación, se muestra el corte geológico (figura 1).

Figura 1. Corte geológico en el que se muestran el perfil del terreno y la conformación litológica y estructural del sector

Fuente: Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010). *Neotectónica del piedemonte llanero entre los municipios de Tauramena, Monterrey y Villanueva (Casanare).*



Nota: En el círculo se aprecia el sitio de la intersección entre los sistemas de transporte vial y por ducto. Para la intersección entre los dos sistemas de transporte, se plantearon inicialmente algunas opciones:

- Un túnel para la vía, pero por el tipo de material y la poca profundidad no se consideró seguro para el tubo.
- Un realineamiento del tubo por terrenos al norte, mediante una variante. Esto impone sacar de funcionamiento el transporte de hidrocarburos, mientras se corta el tubo y se une a la variante.
- Reinstalar el tubo por el mismo alineamiento mediante una perforación dirigida por debajo del nivel de la banca proyectada de la vía. La perforación por estos materiales aluviales es compleja y con una alta posibilidad de que no se pueda culminar, aparte de que se requiere sacar de funcionamiento el transporte de hidrocarburos mientras se corta el tubo y se une al cruce dirigido.
- Soportar el tubo temporalmente con una estructura colgante mientras se hace la excavación en cajón para la vía; luego se construye una estructura en concreto reforzado para el paso de la vía y que soporte el material de reconformación; finalmente, se restaura el terreno del derecho de vía del tubo. Con esta opción, no es necesario interrumpir el transporte de hidrocarburos ni utilizar más tubería.

Después de analizar las opciones, se optó por construir una estructura de soporte con dos torres, cables y pendolones, cimentando las torres con *caisson* por fuera

del chaflán del corte en cajón para la vía y los anclajes de los cables también con *caisson*.

Para el paso de la vía se utilizará un cajón de concreto reforzado, sobre el que se colocará el relleno compactado para restituir el derecho de vía del sistema de transporte de hidrocarburos. Este relleno se contendrá lateralmente con tierra armada, de modo que se logre el ancho de 20 m.

En las figuras siguientes (figuras 2 y 3) se muestra la disposición de las estructuras de soporte del ducto y de la excavación para la construcción de la vía vehicular.

En razón del potencial de erosión del material del depósito aluvial, a medida que se hace el corte se cubre la superficie del talud con malla y concreto lanzado y se instalan algunos anclajes en la parte superior, con miras a mantener confinado el terreno de apoyo de la torre del cortado occidental.

INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

Para caracterizar los materiales del depósito aluvial, se consultaron en principio mapas e informes geológicos y geomorfológicos, principalmente en el Servicio Geológico Colombiano (SGC), así como también informes de consultoría del trazado, construcción y mantenimiento de los sistemas de transporte que se han instalado en este terreno, al igual que de los estudios geotécnicos hechos para la construcción de la vía.

Esta información se complementó con el reconocimiento directo de taludes de las vías existentes en este depósito y de los que se estaban construyendo para el proyecto vial. Además, se midieron el ángulo de incli-

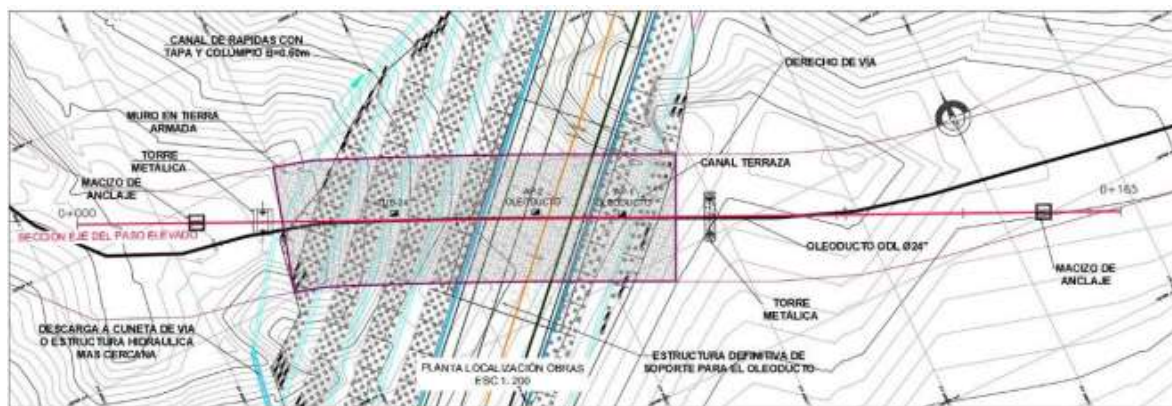


Figura 2. Disposición en planta del sistema de apoyos del ducto y del paso de la carretera

Fuente: Elaboración propia.

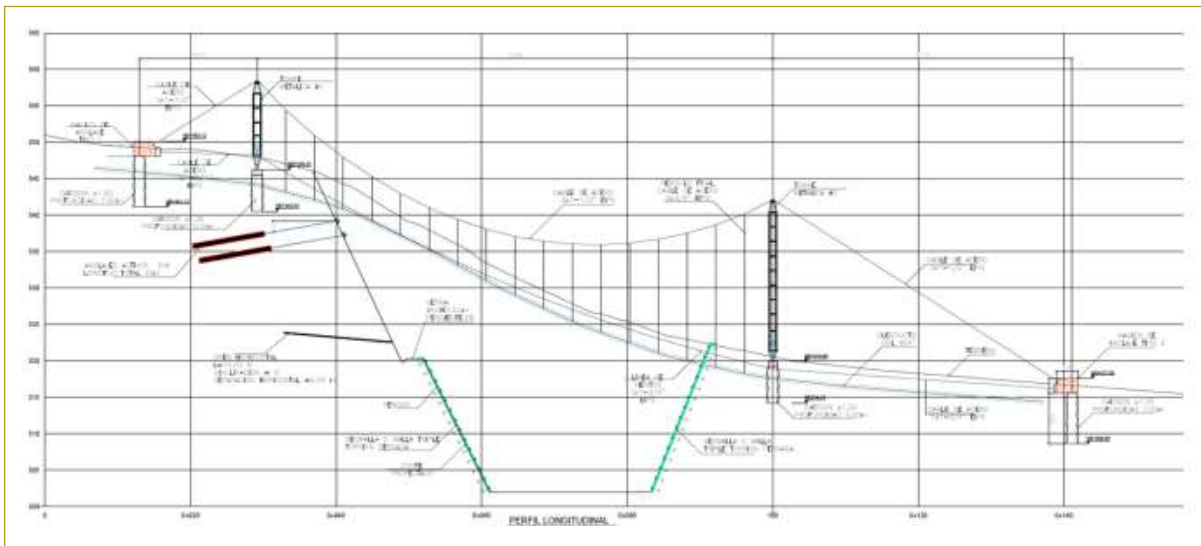


Figura 3. Perfil de la intersección por el eje del ducto.

Fuente: Elaboración propia.

nación y la altura de varios taludes en el sector vecino al sitio de la intersección y se encontraron taludes de inclinación variable entre 65° y 75° , incluso algunos con inclinación negativa (más de 90°). La altura de los taludes observados varía entre 5 m y 50 m (figura 4).



Figura 4. Talud en el DV del ducto.

Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención la composición del depósito aluvial en el sector: arenas, gravas y bloques redondeados sin ningún cementante, con algunas intercalaciones o bolsas de materiales limoarenosos. Es decir, solo material granular. Sin embargo, se mantienen estables los taludes y laderas empinados y altos; en aquellos en los que se observó alguna cobertura vegetal, los procesos de erosión estaban controlados (figura 5).

Es posible observar en los afloramientos la trabazón entre los bloques que forman el depósito aluvial.

Se hizo el ejercicio de trazar líneas por entre el depósito granular para estimar la posible dilatancia que se pueda presentar mediante los desvíos a una línea recta, y se complementó con el trazo de posibles trayectorias y su desviación (figura 5). Se encontraron desviaciones entre 25° y 45° .



Figura 5. Disposición de partículas del depósito aluvial

Fuente: Elaboración propia.

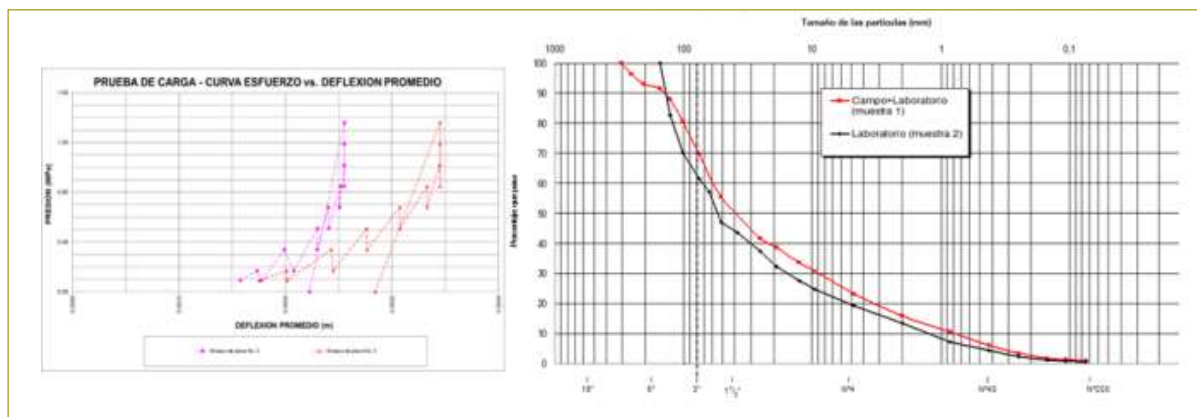


Figura 6. Resultado de ensayos de carga con placa y gradación.

Fuente: Elaboración propia.

Se contó con resultados de gradación y de pruebas de carga vertical en el depósito aluvial, los cuales se muestran más adelante (figura 6).

Con base en los resultados de ensayos de corte directo sobre el material de la matriz limoarenosa, se obtiene un ángulo de fricción de 45° y cohesión efectiva de 60 KPa.

Se verificó el aporte de la dilatancia mediante retroanálisis de estabilidad de los taludes de los cortes del derecho de vía del ducto que tienen una altura superior a 15 m y una inclinación de 65° a 75° .

Se efectuaron pruebas de geofísica MASW, con las que se obtuvieron módulos de deformación a bajas deformaciones. A renglón seguido, se señala el perfil del subsuelo obtenido con la geofísica (figura 7), y

más adelante se muestran (figura 10, parte derecha) los resultados de las pruebas MASW.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se hicieron los análisis de estabilidad y deformación según el criterio de Mohr-Coulomb con envolvente de falla ligeramente parabólica, con base en la caracterización del terreno y la disposición del proyecto (figura 9).

El modelo de análisis y las curvas de módulo de elasticidad obtenidas de las pruebas de geofísica y de la prueba de carga directa con placa se pueden ver más adelante (figura 10). Para la realización de los análisis de estabilidad se modelaron el depósito aluvial y el proceso de construcción por etapas, así:

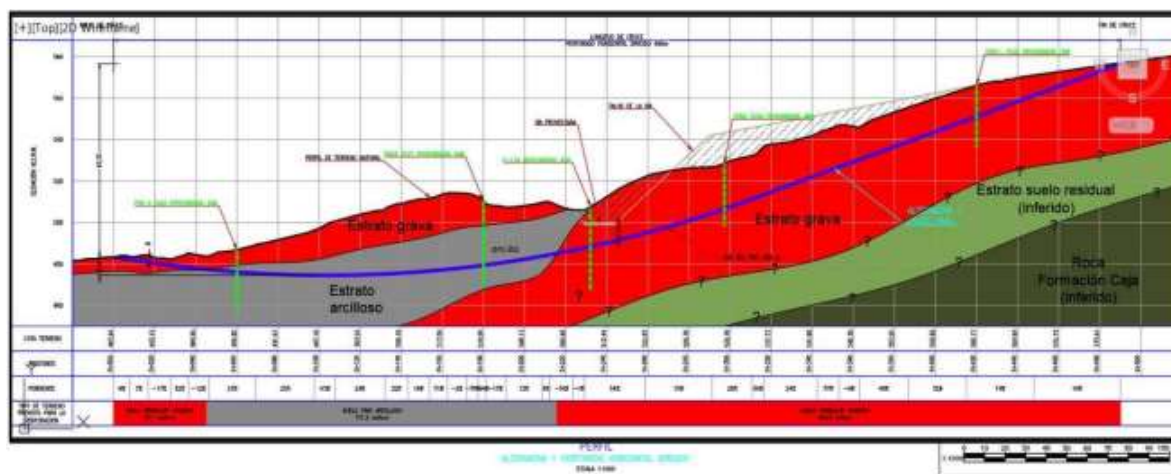


Figura 7. Perfil del terreno obtenido por evaluación sísmica .

Nota: Tomado del estudio para la alternativa de perforación dirigida.

Fuente: ODL, 2020, Estudio para perforación dirigida en la Loma de Buenavista.

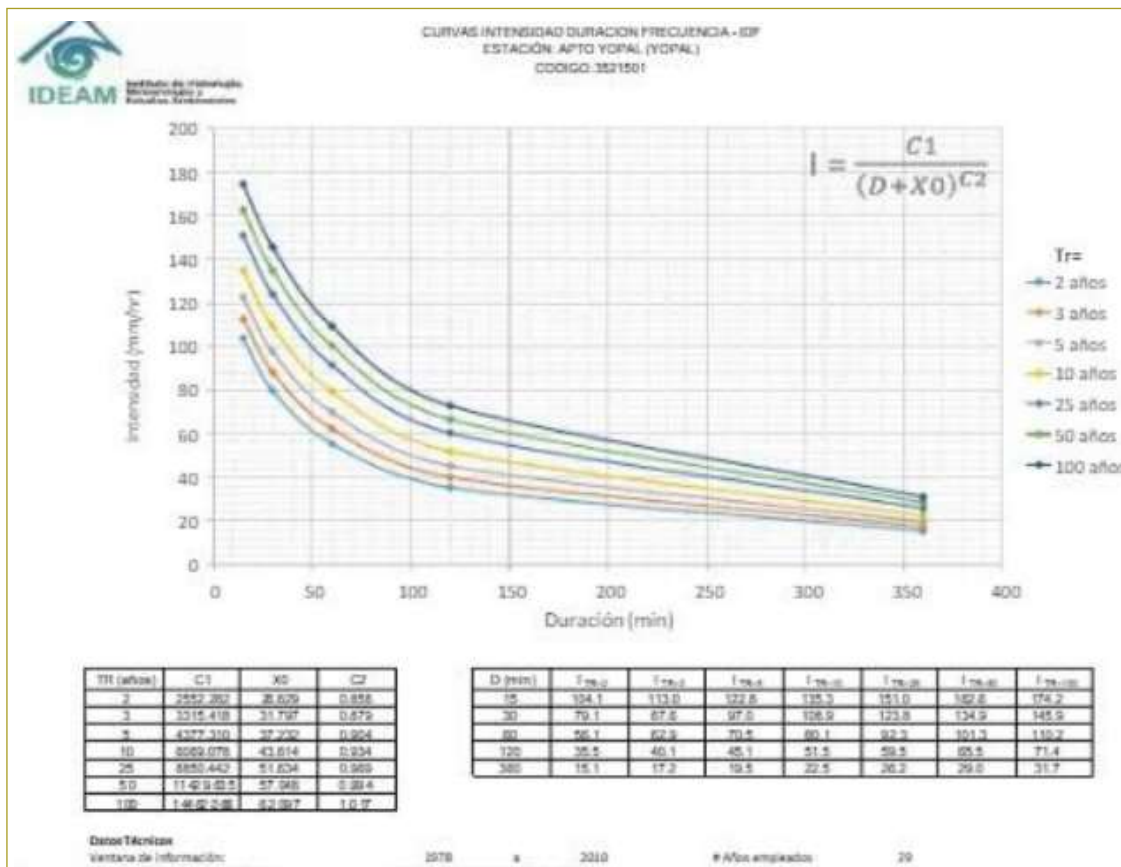


Figura 8. Curvas intensidad-duración-frecuencia.

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2016). Curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), estación aeropuerto del Yopal, código 3521501.

- Estado inicial.
- Construcción del sistema de soporte del tubo.
- Excavación hasta 10 m bajo la base de la torre superior.
- Instalación del refuerzo con anclajes en la parte superior.
- Excavación hasta 45 m de altura en el talud del costado occidental (el más alto).

Para los análisis de estabilidad se consideró el modelo de Mohr-Coulomb, tal como se indica en figuras anteriores (figuras 7 y 9), y se llevaron a cabo las corridas del modelo para las etapas de excavación, donde se evalúan los cambios en el estado de esfuerzos, las deformaciones y el factor de seguridad de la excavación. Se consideraron los siguientes parámetros: módulo de elasticidad de 60 MPa, peso unitario de 20 KN/, cohesión efectiva

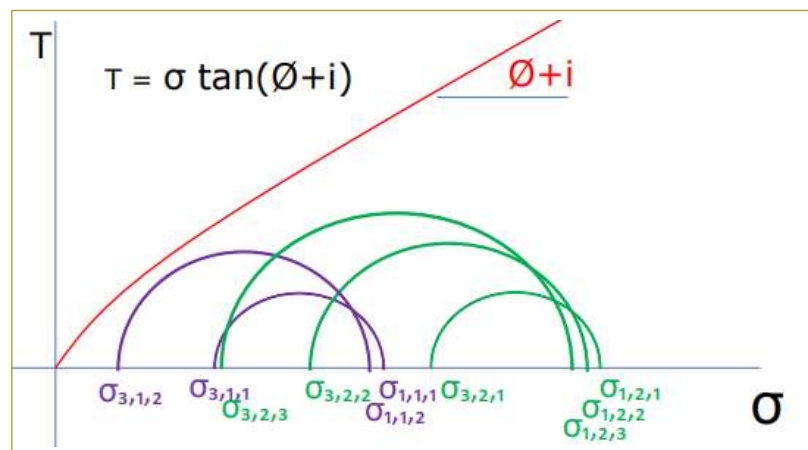


Figura 9. Envoltentes del estado de esfuerzos durante las etapas de la excavación

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Modelo de análisis, en un marco de 70 m de alto y 170 m de ancho.

Nota: A la derecha se pueden apreciar las curvas esfuerzo-deformación obtenidas del MASW.

Fuente: Elaboración propia.

de 10 KPa, fricción más dilatación de 60° y relación de Poisson de 0,25.

En la figura siguiente (figura 11) se muestra el resultado de la modelación para cuatro etapas de excavación, en el que se indican el factor de seguridad y las deformaciones del terreno. Así mismo, se puede apreciar el estado de esfuerzos contra la estructura en cajón para el paso de la carretera y la restauración del derecho de vía del oleoducto, y se complementa con análisis de estabilidad de taludes en equilibrio límite.

CONSIDERACIONES SOBRE CONTENCIÓN DE EXCAVACIONES

Las excavaciones inducen un cambio en el estado de esfuerzos del terreno que hay que evaluar para no acercarse a la situación de falla del terreno.

En la situación del piedemonte llanero, donde las lluvias suelen ser torrenciales, de acuerdo con la curva de intensidad-duración-frecuencia (IDF) del aeropuerto de Yopal (figura 8), la intensidad de corta duración de los aguaceros supera los 100 mm/hora, con una

Figura 11. Modelo de análisis de las etapas de excavación.

Fuente: Elaboración propia.

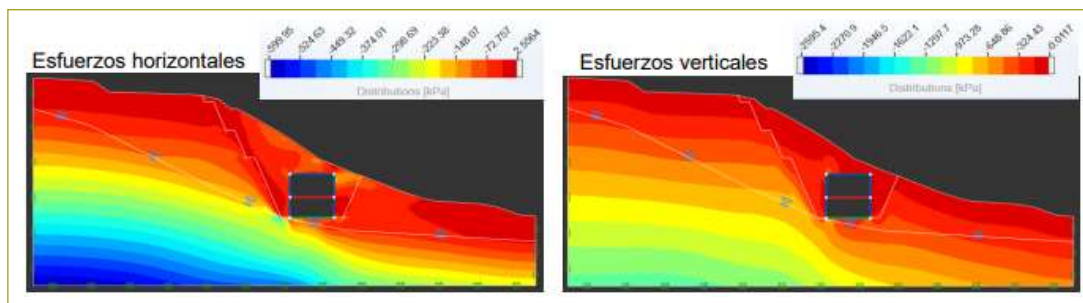
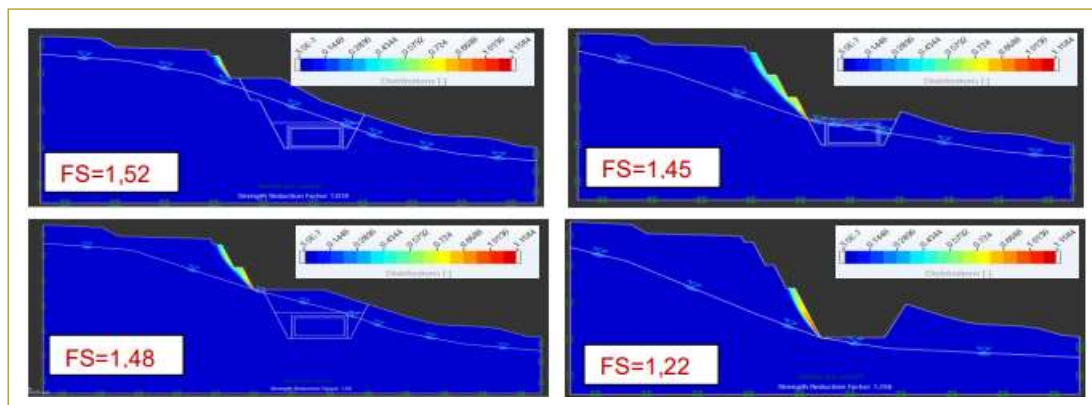


Figura 11. Modelo de análisis de las etapas de excavación.

Fuente: Elaboración propia.

precipitación media anual del orden de 5000 mm, y teniendo en cuenta la erodabilidad del depósito aluvial, es imperativo controlar el agua superficial, para lo cual se debe contar con coberturas impermeables (malla, pernos y concreto lanzado), así como con sistemas de captación y conducción del agua a los cuerpos de agua naturales en forma controlada.

La excavación en la parte superior, con poco confinamiento y con la vecindad de la cimentación de la torre de apoyo del ducto, es quizá la más propensa a perder su estabilidad, por lo que se consideró reforzar el terreno con anclajes en la parte superior del talud del costado más alto.

Para restaurar el confinamiento del terreno y lograr el espacio para la vía, se construirá una estructura cajón que permita el paso de la vía y soporte el relleno de conformación del derecho de vía del sistema de transporte de hidrocarburos. Se complementará con sistemas de drenaje subsuperficial, al nivel de la base de la excavación. Para el resto del talud de corte, por fuera del derecho de vía, se mantendrá el diseño que se ha tenido para los otros taludes de la carretera en este depósito.

El confinamiento lateral del terraplén del derecho de vía se ha propuesto con una estructura de tierra armada.

Las modelaciones del terreno y del proceso constructivo, con la técnica de elementos finitos permite evaluar el comportamiento del terreno y es posible estimar los esfuerzos y deformaciones a que estarían sometidas las estructuras de contención, incluso las reacciones de estas estructuras ante los esfuerzos que les impondrán, ver figuras 13, 14 y 15.

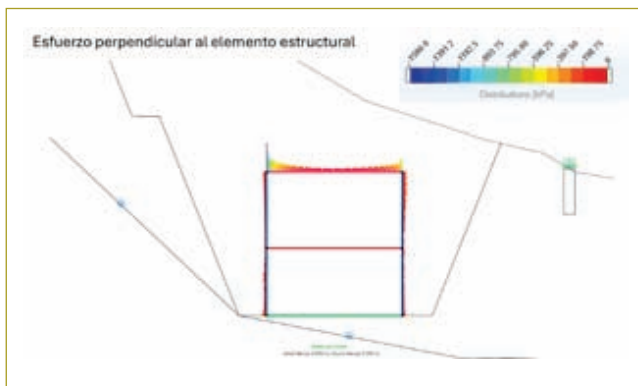


Figura 13. Esfuerzos perpendiculares a la estructura del cajón de paso de la carretera por efecto del relleno térrico alrededor de ella.

Fuente: Elaboración propia.

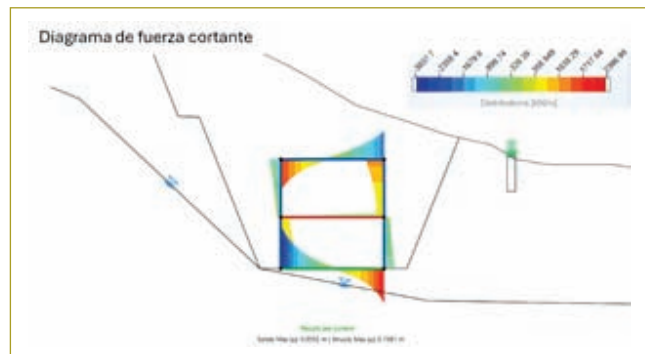


Figura 14. Diagrama de esfuerzos cortantes en los elementos de la estructura de contención, que permite el paso de la carretera y soporta el material de la conformación del derecho de vía del Oleoducto.

Fuente: Elaboración propia.

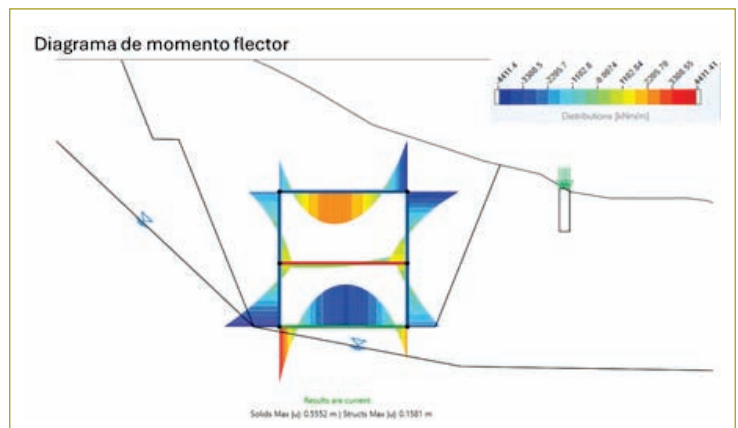


Figura 15. Diagramas de momento flector, en los elementos de la estructura de contención que permite la intersección con los dos sistemas de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de estructuras de contención, tradicionalmente se ha trabajado con una distribución de presiones, triangular, trapezoidal o rectangular, que impone el terreno contra la estructura de contención, independiente del tipo de suelo; con esta información se adelantan los análisis estructurales y se determinan las dimensiones y refuerzo requeridos.

Estas distribuciones regulares de presión contra la estructura, muchas veces no representan el estado de esfuerzos, por ejemplo los de origen tectónico, ha habido casos donde los esfuerzos horizontales superan los gravitacionales y las estructuras no los pueden soportar; también se tienen esfuerzos inducidos por los procesos de compactación de los materiales de relleno entre el terreno y la estructura, los cuales en algunos

materiales pueden duplicar o triplicar lo mostrado en las distribuciones de presión; se tiene el efecto de algunos materiales que pueden ser expansivos al incrementar su humedad; la misma geometría puede inducir diferencias en los empujes considerados.

Para subsanar estas incertidumbres, es necesario contar con la caracterización del terreno, tan detallada como sea posible, incluir en el diseño los procesos constructivos, el control de los materiales involucrados con el sistema de contención.

REFERENCIAS

- Ingeniería y Geotecnia SAS (2022). *Informe de diseño del cruce del oleoducto Rubiales-Monterrey con el proyecto vial Villavicencio-Yopal*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010). *Neotectónica del piedemonte llanero entre los municipios de Tauramena, Monterrey y Villanueva (Casanare)*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2016). *Curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), estación aeropuerto del Yopal, código 3521501*.



Micropilotes: resumen teórico y dos casos en Bogotá

Micropiles: theoretical summary and two cases in Bogotá

LUIS FERNANDO OROZCO ROJAS¹ - MARCELA SALCEDO QUIJANO² -
JUAN SEBASTIÁN RUIZ HERNÁNDEZ³

1. Master of Science Ingeniería Civil. Lfo Ingenieros de Suelos S.A.S.

2. Magíster en Ingeniería Civil. Lfo Ingenieros de Suelos S.A.S.

3. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

lfoingenierosdesuelos@gmail.com - marcela.salcedo@escuelaing.edu.co - juan.ruiz-h@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2025 Aceptado: 31/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta un resumen teórico sobre el comportamiento y diseño de micropilotes, complementado con el análisis de dos casos de aplicación en la ciudad de Bogotá. Se describen los principios fundamentales del sistema, los mecanismos de transferencia de carga y los criterios generales de cálculo asociados a este tipo de cimentación profunda, al tiempo que se destaca su versatilidad en obras de refuerzo, submuración y control de asentamientos. A partir de la experiencia en los casos de estudio, se analizan aspectos relacionados con el desempeño estructural y geotécnico de los micropilotes en condiciones reales de obra, así como consideraciones constructivas relevantes para su implementación en entornos urbanos.

Los resultados y observaciones presentados evidencian el adecuado comportamiento de esta solución en suelos con restricciones geométricas y constructivas, y resaltan su utilidad como opción técnica eficiente en proyectos de rehabilitación y mejoramiento del terreno.

El trabajo aporta una visión aplicada basada en la experiencia profesional, orientada a la toma de decisiones en el diseño y la ejecución de micropilotes.

Palabras claves: micropilotes, pilotes raíz, submuración, control de asentamientos, cimentaciones especiales.

Abstract

This article presents a theoretical summary of the behavior and design of micropiles, complemented by the analysis of two application cases in the city of Bogotá. It describes the fundamental principles of the system, the load transfer mechanisms, and the general calculation criteria associated with this type of deep foundation, highlighting its versatility in reinforcement, underpinning, and settlement control works. Based on the experience in case studies, aspects related to the structural and geotechnical performance of micropiles in real construction conditions are analyzed, as well as construction considerations relevant to their implementation in urban environments.

The results and observations presented demonstrate the adequate performance of this solution in soils with geometric and construction restrictions, highlighting its usefulness as an efficient technical alternative in land rehabilitation and improvement projects.

The work provides an applied vision based on professional experience, aimed at decision-making in the design and execution of micropiles.

Keywords: micropiles, root piles, underpinning, settlement control, special foundations.

INTRODUCCIÓN

Los micropilotes o pilotes raíz (*palo radice*) tienen aplicaciones muy importantes para submurar o estabilizar suelos que podrían presentar problemas. Se trata de elementos de poco diámetro que llevan las cargas a suelos más competentes, a mayor profundidad, y que se pueden construir con máquinas de perforación con acceso a sitios difíciles. Por este motivo, algunas de sus aplicaciones incluyen la submuración de edificios que están sufriendo asentamientos totales o diferenciales excesivos; pero también se utilizan para estabilizar excavaciones cercanas a edificios, para estabilizar taludes o incluso para permitir el paso de túneles bajo estructuras antiguas.

La construcción de micropilotes raíz (*palo radice*) la inició a principios de la década de los cincuenta en Italia la firma Fondedile, cuyo director técnico era Fernando Lizzi. Después de esto, se exportó esta técnica a otros países de Europa en los años sesenta y a mediados de la década de los setenta se llevó a Estados Unidos. Por un problema de patentes a nombre de los italianos, en Estados Unidos se denominaron micropilotes (*micropiles*) y recientemente se adoptó el nombre de *root piles*. Su uso se ha esparcido por varios países del mundo —pues son de gran utilidad—, entre estos Colombia, a donde entraron a principios de los años ochenta.

Debemos aclarar que en muchos libros de fundaciones y geotecnia se incluye bibliografía acerca de este tipo de cimentación y que buena parte de la información aquí contenida se basa en el manual *Micropile design and construction*, del Departamento de Transportes de Estados Unidos, ya que este manual contiene toda la información básica necesaria para el diseño y la construcción de los micropilotes inyectados a presión. Entre los libros de geotecnia en los que aparecen capítulos con este tema se destacan *Manual de técnicas de mejora del terreno* (cap. 7), de Ana Bielza Feliú, y *Ground control and improvement*, de Petros P. Xanthakos, Lee W. Abramson y Donald A. Bruce.

El término *micropilotes* se puede utilizar para describir pilotes de pequeño diámetro y de longitudes relativamente cortas. Sin embargo, con base en su uso en Estados Unidos, la palabra *micropiles* se refiere principalmente a los pilotes pequeños, pero de gran longitud, inyectados a presión, esto es, a los pilotes raíz. Estos son muy diferentes de los pilotes pequeños, ya que tienen longitudes importantes, superiores en

muchos casos a 20 y 30 m y hasta 70 u 80 m, con diámetros entre 15 y 30 cm. Las presiones de inyección varían entre 5 y 10 atm —en suelos más blandos—, y pueden llegar a más de 20 o 30 atm. Además, los micropilotes raíz trasladan el ciento por ciento de su carga al suelo de fundación mediante el refuerzo, pues el mortero con el cual se construyen no tiene una gran resistencia a la compresión; por lo tanto, la transmisión de esfuerzos se hace por fricción entre el mortero y el suelo circundante, a una profundidad tal que estos suelos sean más estables (capas de suelo más competentes). La punta no es capaz de soportar cargas altas debido a que su área es pequeña.

A continuación, se describen las características de diseño para los micropilotes raíz individuales y para los grupos de pilotes (micropilotes reticulados). Como se verá, los sistemas de diseño son similares a los de los pilotes de gran diámetro y profundidad; la diferencia es que estos, por estar inyectados a presión, pueden soportar cargas más altas de las que corresponden a su diámetro, aparte de que se pueden construir en espacios muy reducidos, con máquinas pequeñas.

INTRODUCTION

Micropiles, also known as root piles have important applications in underpinning and in the stabilization of soils that may present stability problems. These elements have a small diameter and transfer loads to more competent soil layers at greater depths. They can be installed using drilling equipment capable of operating in restricted or difficult-access locations. For this reason, their applications include underpinning buildings that experience excessive total or differential settlement. They are also used to stabilize excavations near existing structures, reinforce slopes, and allow tunnel construction beneath old buildings.

The construction of root piles began in the early 1950s in Italy by the company Fondedile, whose technical director was Fernando Lizzi. Subsequently, the technique spread to other European countries during the 1960s and was introduced in the United States in the mid-1970s. Due to patent issues associated with the Italian technology, these elements were referred to in the United States as micropiles. Today, this term is widely used internationally. Their application has expanded to several countries worldwide, including Colombia, where they were introduced in the early 1980s.

Numerous geotechnical and foundation engineering books include references to this type of foundation. Much of the information presented in this study is based on the manual *Micropile Design and Construction*, published by the U.S. Department of Transportation, which provides fundamental guidelines for the design and construction of pressure-grouted micropiles. Among the geotechnical engineering references that address this topic are *Manual de técnicas de mejora del terreno* (Chapter 7) by Ana Bielza Feliú and *Ground Control and Improvement* by Petros P. Xanthakos, Lee W. Abramson, and Donald A. Bruce.

The term micropiles refers to piles with small diameters and relatively long lengths. In practice, however, micropiles are typically slender elements installed using pressure grouting techniques. They differ from conventional small piles because they can reach considerable lengths, often exceed 20 or 30 m and sometimes reach depths of 70 or 80 m, with diameters ranging from approximately 15 to 30 cm. Grouting pressures typically vary between 5 and 10 atm in softer soils and may exceed 20 or 30 atm in certain conditions.

Root micropiles transfer most of their load to the surrounding soil through friction along the grout-soil interface, as the grout itself does not typically provide high compressive strength. Therefore, load transfer occurs primarily through skin friction between the grout and the surrounding soil layers, which are usually more stable and competent at greater depths. The pile tip contributes little to load resistance because of its relatively small area.

The design characteristics of individual root micropiles and micropile groups (micropile meshes) are presented below. As it will be shown, the design procedures are similar to those used for large-diameter deep foundations. However, because micropiles are installed using pressure grouting, they can sustain higher loads relative to their diameter. In addition, they can be constructed in very confined spaces using relatively small drilling equipment.

CÁLCULO DE CAPACIDAD

El cálculo de los micropilotes comprende cuatro etapas o fases claves:

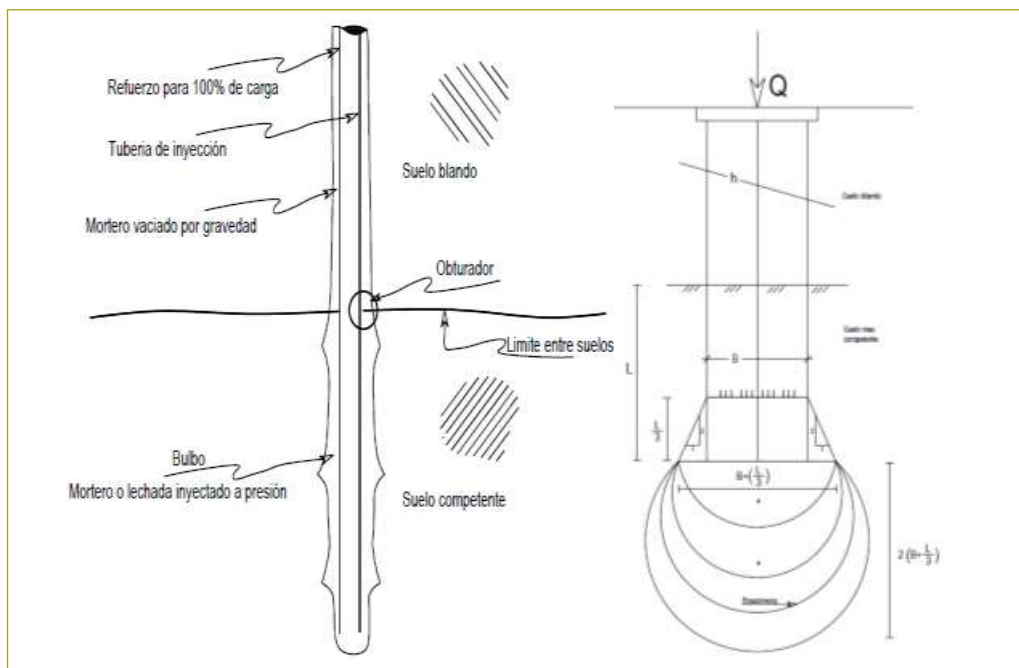
1. **Cálculo de la capacidad de soporte de un pilote en el suelo.** En los casos que se presentan más adelante se trata de establecer la capacidad por fricción (la punta tiene un área pequeña) en suelos compactos o de mejor capacidad que se encuentran por debajo de suelos muy blandos, los cuales hay que atravesar para lograr el soporte o la estabilización de la superestructura. Es lo mismo que la capacidad por fricción de pilotes grandes (de mayor diámetro), pero en razón de que son inyectados a presión se pueden emplear diámetros de diseño de hasta 1,5 veces el diámetro de perforación real (el diámetro se incrementa con la presión de inyección, lo cual se puede comparar con el consumo de mortero).
2. **Cálculo del refuerzo conformado por varillas de acero o por el tubo de acero autoperforante mediante el cual se inyecta el mortero (perforaciones y manguitos de caucho, así como obturadores).** El refuerzo debe ser capaz de soportar el 100 % de la carga a la falla (según diseño) del micropilote a compresión, puesto que en este caso el mortero es incapaz de soportar cargas altas a la compresión.
3. **Revisión de que el mortero puede soportar las varillas o tubo por fricción y trasladar estas cargas al suelo de soporte.** Las varillas o refuerzo no se pueden enterrar o fallar en la superficie del mortero; por lo general, los micropilotes cumplen este requisito con facilidad.
4. **Chequeo de que, además de la capacidad individual, la capacidad del grupo de pilotes no excede la resistencia al corte ni los asentamientos permitidos, según el proyecto.** Generalmente, se usan grupos de dos, tres o cuatro micropilotes que no sobrecargan el terreno, pero esto se debe revisar cuidadosamente y establecer la separación mínima entre los elementos.
5. **Dependencia de los micropilotes al refuerzo de acero.** En razón de esta dependencia, es necesario tener en cuenta la corrosión y el posible deterioro, a mediano plazo, en medios agresivos.

ASENTAMIENTOS

Generalmente, un solo micropilote raíz, con parámetros de fricción y de punta en un suelo competente, por debajo del suelo blando, bien calculado, sufrirá

Figura 1. Esquema de micropilote raíz (izquierda), grupo de pilotes, capacidad de grupo y cálculo de asentamientos (derecha)

Fuente: Elaboración propia.



asentamientos a causa del acortamiento elástico del pilote (acortamiento de varillas o tubo) y no resultará en asentamientos (o muy pequeños) por consolidación de los suelos arcillosos o arenosos circundantes.

Sin embargo, el grupo de pilotes bajo un dado, bajo la placa estructural o bajo la totalidad del edificio sí puede sufrir asentamientos que se deben calcular y prever en el diseño de la superestructura. Cuando estos son altos e inadmisibles, hay que recurrir a una mayor separación de pilotes de un grupo o a un grupo de pilotes de mayor longitud o de mayor empotramiento en los suelos competentes.

Los asentamientos se calculan, como en el caso de pilotes de mayor diámetro, utilizando las ecuaciones elásticas de transmisión de esfuerzos a la mayor profundidad y las ecuaciones de consolidación unidimensional de K. Terzaghi. Por supuesto, también se pueden emplear elementos finitos, como RocScience, Midas o Sigma W, pero teniendo mucha seguridad en los parámetros de compresibilidad, coeficiente de consolidación (tiempos), niveles de drenaje en el perfil, etc. Se podría decir que hay que calibrar el programa con ensayos de consolidación sobre los suelos solicitados por el grupo.

Por ningún motivo se pueden calcular los asentamientos elásticos o inmediatos como único valor; a estos se deben sumar los asentamientos por consolidación primaria.

El cálculo de asentamientos se debe hacer como mínimo hasta una profundidad de dos veces el ancho B del grupo, medidos bajo $Z_1 + 2/3 L$ (figura 1).

OTROS USOS

Los micropilotes también se utilizan para soportar cargas de tracción, cargas horizontales (los pilotes individuales son muy esbeltos, pero como grupo funcionan bien), reforzamiento de masas de suelo en el caso de excavaciones cerca de construcciones existentes, estabilidad de taludes, etc.

En Bogotá, se recomendaron pilotes diagonales para submurar la iglesia de La Candelaria, muro al costado occidental, en la carrera 4, al norte de la calle 11, ya que esta sufrió asentamientos hacia occidente (no tenemos información de si se construyeron o no).

Hay más ejemplos, incluso de micropilotes raíz que no llegan a un manto portante; son flotantes en la arcilla blanda, pero desarrollan su capacidad con una buena longitud en la parte inferior.

En este artículo se presentan dos ejemplos que han sido exitosos: uno es la submuración del tubo de 60" (GOT-60") que va del tanque Wiesner a la planta de acueducto de Santa Bárbara, y que sufrió asentamientos de importancia (1,60 m máx.) a lo largo de la calle 114 entre carreras 7 y 9 (NQS); el otro es un edificio de 19

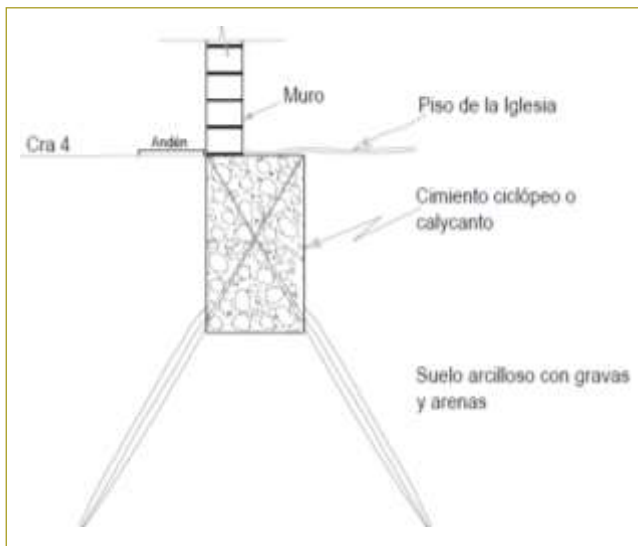


Figura 2. Pilotes diagonales de la iglesia de La Candelaria

Nota: Recomendación del ingeniero R. Maldonado.

Fuente: Elaboración propia.

pisos más sótano que estaba sufriendo asentamientos de hasta 39 cm, situado al occidente de la avenida Boyacá, apoyado adecuadamente en los materiales duros del piedemonte al occidente pero con pilotes muy cortos al oriente (zona más plana).

Caso 1. Estabilización tubo $\varnothing$ 60", Usaquén

Con anterioridad a la construcción de los edificios del Centro Empresarial Santa Bárbara se instaló un tubo de 60" de diámetro (1,52 m) en acero revestido de concreto entre la avenida carrera 7 y la carrera 9, a lo largo de la calle 114. Este tubo lleva aguas limpias del acueducto a presión (260 m) desde el tanque Wiesner —al oriente de la ciudad— hasta la planta de Santana.

El tubo, que se cimentó a una profundidad promedio de 3,7 m bajo la superficie original del terreno, sufrió

asentamientos de importancia cuando se construyeron los sótanos de los edificios de Teleport, al sur de la calle 114 (a 21,0 m de distancia a lo largo entre las carreras 7 y 9) y del parqueadero del Centro Empresarial, ubicado al norte de esta calle (a 24,0 m de distancia, como se ve en la planta de la figura 4).

Los asentamientos alcanzaron valores de 1,6 m al occidente de la rotonda y de 1,3 al oriente de la rotonda localizada hacia la mitad de la longitud de la calle 114. En el sitio de la rotonda el asentamiento fue un poco menor, cercano a 1,0 m. Este tubo lo había diseñado Ingetec, por lo cual el ingeniero Gabriel Otero analizaba el estado del tubo, sus curvaturas y deflexiones causadas por el asentamiento prácticamente todas las semanas, debido a que mientras se efectuaban excavaciones del cuarto sótano (a 15,0 m de profundidad) en el edificio Teleport el tubo sufría asentamientos de 1 cm al día, hasta cuando se interrumpían nuevamente estas excavaciones.

El perfil estratigráfico típico del piedemonte tiene limos y arcillas de 3,0 o 4,0 m de espesor, y de este nivel hacia abajo hay capas de arena intercaladas con los limos blandos que predominan en el perfil; es de anotar que prevalece una capa de arenas con agua a presión entre 23,0 y 25,0 m de profundidad. Por debajo de estos suelos hay limos blandos, una delgada capa de turba, y entre los 33,0 y 43,0 m bajo la superficie, aproximadamente, aparecen gravas con arena intercaladas con delgados lentes de limo. Se adjunta un perfil estratigráfico típico que, por lo demás, era bastante variable (figura 5).

El nivel de agua freática está a profundidades entre 1,0 y 3,0 m, pero al llegar al nivel de las arenas, a 23,0 m, el agua se encuentra sometida a presión artésiana y se eleva hasta alturas superiores a 5,0 o 6,0 m por encima del nivel del terreno. Esta es una condición típica de los terrenos del piedemonte entre la carrera 7 y la carrera

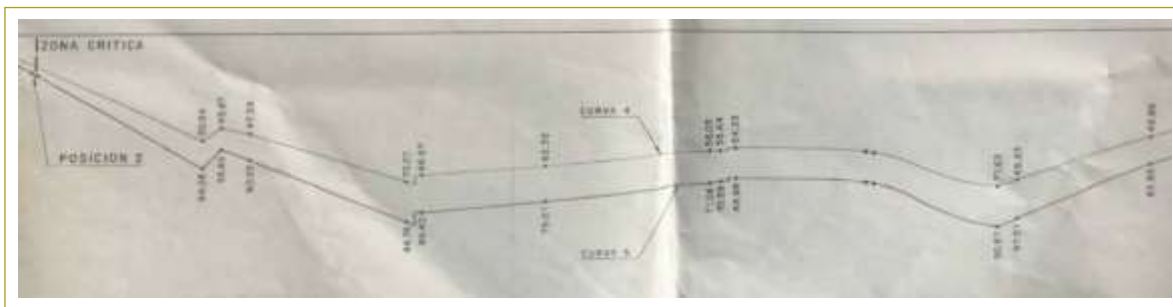


Figura 3. Asentamientos del tubo en una de estas etapas (30 de marzo de 1995)

Fuente: Elaboración propia.

9 desde Chapinero hasta el norte de la calle 150, pero no en todos los casos es igual, ya que el piedemonte se aleja hacia el oriente en algunos puntos.

A causa de los asentamientos se tuvo que interrumpir el servicio de agua alimentado por este tubo en dos o tres ocasiones, cada vez que se observaba que las deformaciones por curvatura del tubo eran tan altas que este se podría fracturar y, por consiguiente, causar un daño incalculable en la zona. En estas ocasiones se instalaron uniones Dresser, diseñadas por American Pipe. En el plano presentado en la figura siguiente (figura 4), con la localización del tubo aparecen los sitios donde fue necesario instalar la unión Dresser para evitar la rotura; en total, se instalaron cuatro uniones Dresser entre las carreras 7 y 9 y una quinta de estas al oriente de la carrera 7. Por supuesto, cada vez que se cortaba el tubo para la instalación de la unión debidamente preconstruida se relajaban los esfuerzos en el sitio de la curvatura, además de que la unión Dresser permitía deformaciones angulares adicionales del tubo de 1° a 3° .

Sin embargo, hubo que dar una solución definitiva a la cimentación del tubo, puesto que no se podía permitir que este siguiera sufriendo asentamientos de importancia a mediano o largo plazo. Inicialmente, se programaron inyecciones de mortero seco (1" Slump) a gran presión, pero después de efectuadas las primeras inyecciones en la zona de mayor asentamiento se observó que el movimiento se aceleraba luego de inyectado el terreno, posiblemente por el exceso de presión de poros que generaban estas inyecciones, y que al disiparse resultaba en asentamientos rápidos. Se escogió, por lo tanto, una cimentación con micropilotes (pilotes raíz inyectados a presión), fundados en las gravas o suelos más competentes entre los 33,0 y 43,0 m de profundidad (figura 5).

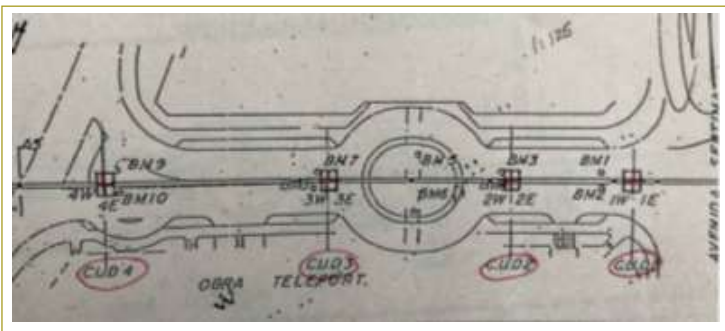


Figura 4. Planta del tubo.

Fuente: Elaboración propia.

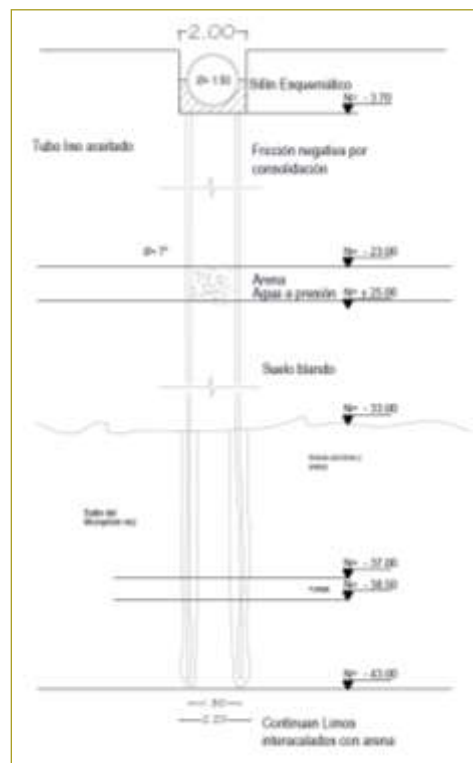


Figura 5. Esquema de sillines y micropilotes.

Fuente: Elaboración propia.

Cada 8,0 m a lo largo de la longitud del tubo se construyeron sillines bajo el tubo, que estarían soportados a su vez por micropilotes fundados a las profundidades anotadas. Cada sillín estaría soportado por dos pilotes con 200 T de capacidad cada uno a la falla (400 T los dos micropilotes), los que, por consiguiente, trabajarían para el soporte de 100 T por elemento (200 T de trabajo por cada sillín).

Se estableció que el tubo, en 8,0 m de longitud aferrante a cada sillín, pesaba unas 80 T, por lo que cada pilote tendría que soportar 40 T, correspondientes a la mitad de las 80 T en los 8,0 m. Adicionalmente, se calculó una fricción negativa por asentamiento de la sabana del orden de 60 T por pilote, y pese a que este se construyó siempre con un tubo de acero liso aceitado hasta 33,0 m de profundidad, se estimó que el terreno lateral podría generar cargas negativas con este orden de magnitud.

Se efectuó un ensayo de carga estático, con control de carga, sobre un micropilote inyectado a presión, construido por fuera de la proyección del tubo, hacia el norte de este y en el tercio occidental del área de influencia del tubo. Salazar Ferro Ingenieros y los ingenieros de nuestra oficina no solamente diseñaron esta prueba de carga, sino que determinaron cómo serían



Figura 6. Fotos del ensayo de carga (izquierda) y del tubo destapado para construcción de sillines (derecha)

Fuente: Elaboración propia.

los incrementos de carga y hasta qué carga se llevaría a cabo la prueba. Se adjunta una foto de la prueba y los resultados de esfuerzo deformación (figuras 6 y 7).

Gracias a esta prueba se comprobó que la capacidad de carga para cada pilote era de cerca de 200 T a la falla y, por lo tanto, que sería una solución aceptable a largo plazo para estabilizar la tubería. Cabe anotar que en el grupo de estudios y diseños tanto de la tubería como de los suelos en la zona había ingenieros de Ingetec, de la oficina del ingeniero Roberto Maldonado (suelos de Teleport), de nuestra oficina (suelos de los edificios al norte de la calle 114), asesores de la Empresa de Acueducto

como Álvaro Jaime González (quien aprobó el diseño de la prueba de carga y sus resultados), ingenieros de la firma de Pablo Sáenz y Cía., constructores de Teleport e ingenieros de la firma Prosantana, constructores del parqueadero al norte de la calle 114.

2. Caso 2. Control de asentamientos de un edificio de 19 pisos, Colina Campestre

Este edificio quedó bien cimentado al costado occidental, en la zona más alta del terreno, mediante pilotes de 19,0 m de longitud que penetraban en las gravas y además en las arcillolitas subsiguientes que se encuentran allí desde 15,0 m de profundidad. El mismo edificio al costado oriental contó con pilotes de 19,0 m que no llegaron a las gravas y menos aún a las arcillolitas que se encuentran en este sitio por debajo de 28,0 o 29,0 m bajo la superficie, todo esto en un terreno relativamente plano, piedemonte oriental del cerro de Suba (figura 8).

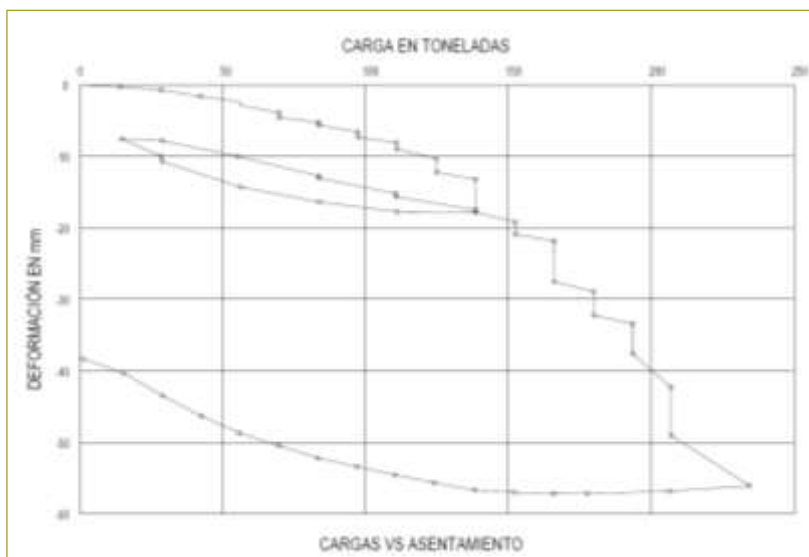
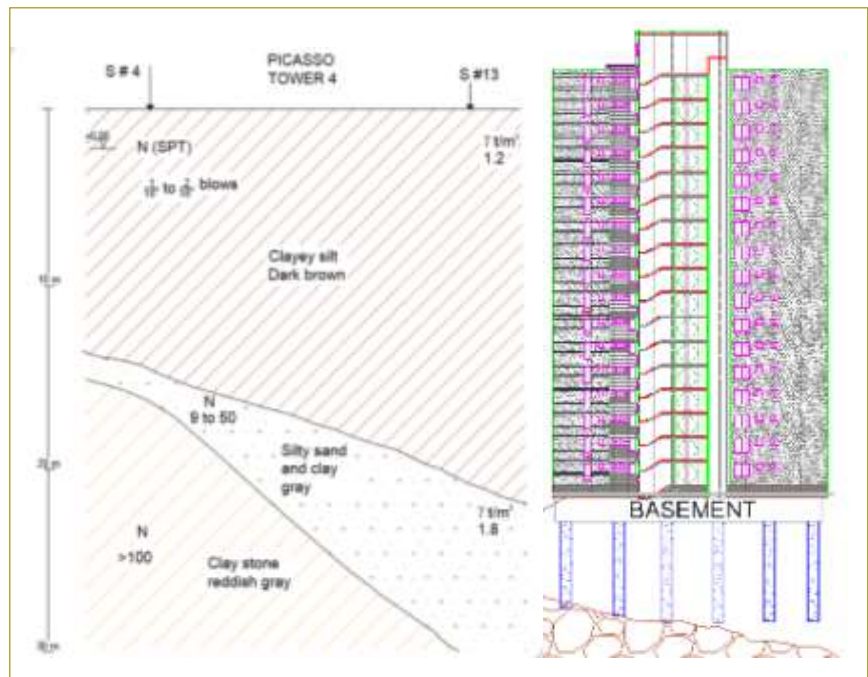


Figura 7. Resultado del ensayo de carga

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Perfil estratigráfico del piedemonte (izquierda) y esquema ilustrativo de la cimentación hecha (derecha).

Fuente: Elaboración propia.



Una vez hechos los pilotes y cuando la torre de 19 pisos estaba en construcción, hacia fines del 2011 y principios del 2012, se notó un mayor asentamiento del edificio hacia oriente; en dos meses alcanzó a descender unos 8 cm hacia este extremo. Ante esta circunstancia se decidió estabilizar el edificio, puesto que los asentamientos diferenciales hacia oriente no disminuían. Lo primero fue diseñar los micropilotes raíz bajo los dados de los pilotes construidos inicialmente, pero en este caso llegando a los suelos duros y penetrando en

estos al menos 5,0 m ($\varnothing$ teórico = 15 cm QT/pilote = 40 T). Se presenta un plano (figura 9) con la localización de los pilotes originales y la localización de los micropilotes o pilotes raíz inyectados a presión, plano en el que también se observa el asentamiento que alcanzó a presentarse en el periodo de tiempo entre la construcción de la torre, a fines de 2011 y principios de 2012, y el momento en el que fue posible construir los micropilotes y vincularlos a la torre.

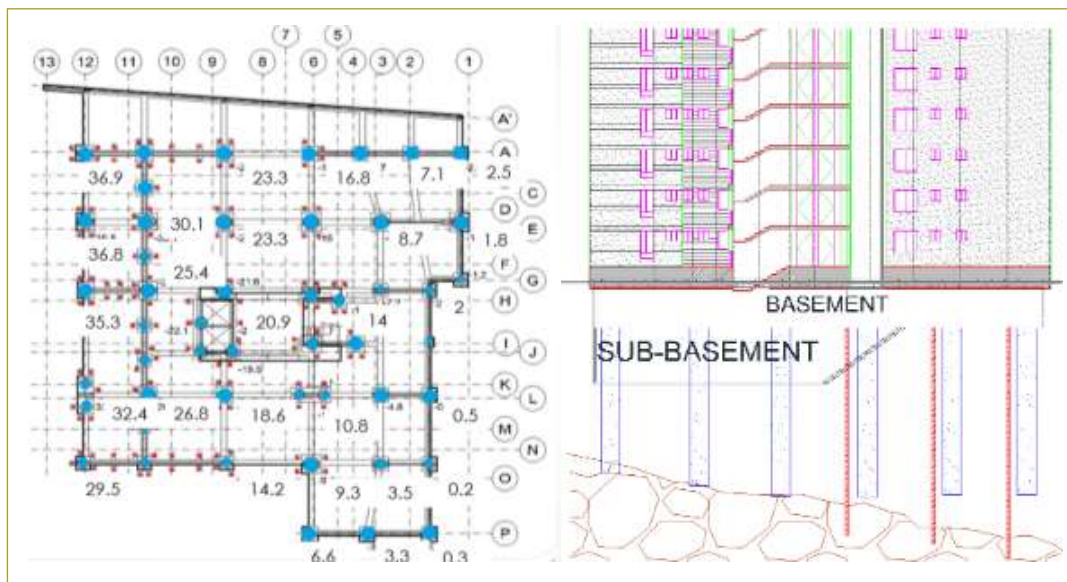


Figura 9. Planta del edificio con pilotes, micropilotes y asentamientos diferenciales (izquierda) y esquema del reforzamiento hecho (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Este edificio se asentó 37 cm hacia oriente y la solución, además de estabilizar la torre, fue enderezarla, lo que permitió su asentamiento hacia occidente, asentamiento que se consiguió cortando los pilotes originales y permitiendo el descenso con gatos hidráulicos y mecánicos. Todo se analizó cuidadosamente; la Universidad de los Andes estudió el comportamiento de la torre a medida que se presentaba el movimiento de verticalización con programas de elementos finitos en tres dimensiones, con el fin de garantizar que este movimiento no generaba esfuerzos excesivos en la torre, ya construida hasta el piso 19. Salazar Ferro realizó la obra y Cusezar, firma propietaria, facilitó todos los elementos necesarios para lograr la verticalización con asentamiento de 37 cm hacia occidente. También es importante anotar la contribución de PyP Ingenieros Calculistas, empresa representada por Armando Palomino, que imaginó y diseñó todos los pasos de la obra (la obra se debe principalmente a él); nuestra oficina participó en los análisis de cimentación y en las recomendaciones para la estabilización.

A continuación se presenta, además de la localización de pilotes y micropilotes, el proceso de verticalización con una duración de ocho meses (figura 10).

CONCLUSIONES

Se ha hecho un compendio de recomendaciones para el cálculo de capacidad de soporte y asentamientos de estructuras cimentadas o repotenciadas con micropilotes. Los dos casos presentados para la estabilización del tubo a presión de la calle 114, entre carreras 7 y 9, y la estabilización del edificio Picasso han sido exitosos a largo plazo en la estabilización y el buen comportamiento de estas estructuras.

Cimentar o submurar con micropilotes raíz es una opción valiosa para fundar edificaciones con problemas o para hacer cimentaciones en espacios muy limitados. En Bogotá, la cimentación con micropilotes raíz se está utilizando aproximadamente desde 1985 y ya hay un buen número de edificios que muestran excelente comportamiento con este tipo de fundación.

En este artículo no se presentan otras aplicaciones de los micropilotes raíz, tales como la estabilización de excavaciones, la solución de problemas de estabilidad de taludes y, posiblemente, excavaciones bajo edificaciones

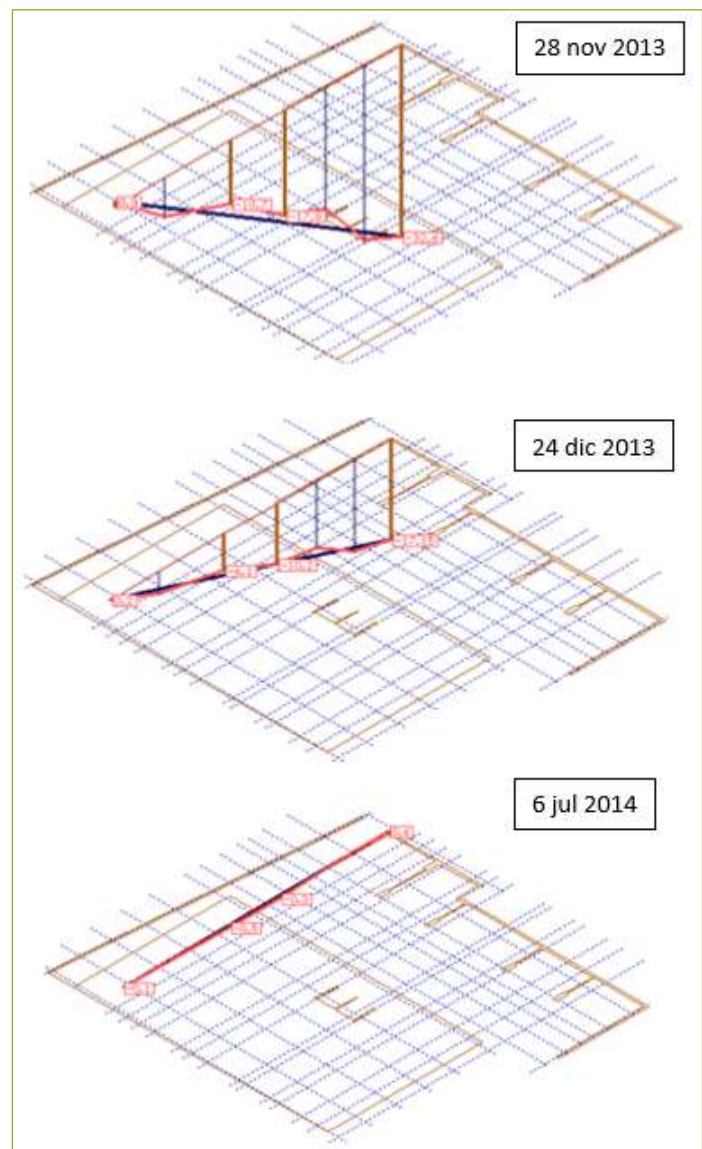


Figura 10. Figuras ilustrativas del proceso de asentamiento del eje A durante la verticalización.

Fuente: Elaboración propia.

antiguas que son de conservación. Estas aplicaciones serían objeto de otro artículo.

Agradecimientos

Agradecemos a los ingenieros que participaron en la estabilización de la tubería de 60" en la calle 114, en especial al ingeniero Jaime Beltrán, gerente de toda la operación. Igualmente, les damos las gracias a los profesionales de la firma Cusezar, al ingeniero Francisco Salazar Ferro y el ingeniero Armando Palomino, quienes ayudaron a que el proceso de estabilización

y verticalización de la torre de 19 pisos fuera todo un éxito.

Así mismo, agradecemos a nuestra asistente ejecutiva, la señora Sonia Cruz, por su paciencia y los consejos dados durante la elaboración de este artículo.

Autoría

Los autores contribuyeron en conjunto a la concepción del artículo, el desarrollo del marco teórico y el análisis de los casos de estudio. Todos los autores revisaron y

aprobaron la versión final del manuscrito, y además declararon no tener conflicto de intereses en relación con este artículo.

REFERENCIAS

- Bielza, A. (1999). *Manual de técnicas de tratamiento del terreno*. Entorno Gráfico.
- Federal Highway Administration (2005). *Micropile design and construction* (publication FHWA NHI-05-039, NHI Course 132078).
- Xanthakos, P., Abramson, L., & Bruce, D. (1994). *Ground control and improvement*. John Wiley & Sons.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* tiene como propósito principal ser un canal de divulgación del conocimiento técnico y científico que contribuya al desarrollo del país. Buscamos publicar trabajos de alta calidad editorial y rigor académico, que aporten a la discusión y avance de todas las áreas de la ingeniería, con un enfoque crítico, propositivo e interdisciplinario.

En nuestra publicación se priorizan tres tipos de contribuciones que fortalecen su visibilidad y proyección en comunidades científicas nacionales e internacionales:

- **Artículo de investigación científica y tecnológica.** En esta clase de manuscritos se presentan, en forma detallada, resultados originales, derivados de proyectos de investigación. Se estructura habitualmente en cuatro secciones: introducción, metodología, resultados y conclusiones. En la introducción se plantea el problema, se contextualiza su importancia, se formulan los objetivos y se incluye una revisión del estado del arte. En la metodología se exponen el diseño del estudio, las técnicas empleadas y los criterios de validez. Los resultados muestran los hallazgos de manera clara, apoyados con frecuencia en tablas o figuras. Finalmente, en las conclusiones se interpretan los datos obtenidos y se discute su impacto, además de que se pueden incluir recomendaciones para futuras investigaciones. El contenido de estos artículos debe fundamentarse en información verificable, respetar principios éticos y estar correctamente referenciado. Su extensión aproximada va de 5.000 a 8.000 palabras.
- **Artículo de reflexión.** Es un documento que surge de un proceso investigativo o académico, en el cual el autor desarrolla un análisis crítico, interpretativo o propositivo sobre un tema en particular. Por medio de una postura argumentada, sustentada en fuentes teóricas y experiencias, se construye una visión personal pero rigurosa sobre el objeto de estudio. La estructura del artículo incluye una introducción clara, un desarrollo temático con enfoque reflexivo y una conclusión que sintetiza los aportes, reafirma la posición del autor y plantea posibles líneas de indagación. Su extensión sugerida está entre 3.000 y 6.000 palabras.
- **Artículo de revisión.** En este tipo de artículos se analizan sistemáticamente los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, con el propósito de identificar avances, debates, tendencias y vacíos en un campo particular de la ciencia o la tecnología. No se trata de una simple recopilación de fuentes, sino de una integración crítica que permita proponer nuevas perspectivas o rutas investigativas. Su estructura incluye introducción, criterios y métodos de búsqueda, análisis temático, discusión y conclusiones. Se exige una revisión bibliográfica exhaustiva y bien documentada, con una extensión entre 6.000 y 10.000 palabras.

Además de estas tres tipologías principales, la revista contempla otras formas de contribución académica, tales como las siguientes:

- **Artículo corto.** Comunica resultados preliminares o parciales de investigaciones en curso que, por su relevancia o novedad, requieren una difusión temprana. Es un documento breve (entre 2.000 y 3.000 palabras), de redacción precisa y estructura básica: introducción, metodología resumida, resultados y conclusiones iniciales.

- **Reporte de caso.** Presenta el análisis detallado de una situación, experiencia técnica o intervención metodológica particular, con el fin de compartir lecciones aprendidas y reflexiones aplicables a contextos similares. Es común en áreas aplicadas, como la ingeniería, la salud, la educación o la gestión pública. Incluye descripción del caso, análisis crítico y discusión de sus implicaciones.
- **Revisión de tema.** A diferencia de un artículo de revisión sistemática, en esta clase de textos se ofrece una mirada crítica y estructurada sobre un tema específico, sin pretender abarcar toda la bibliografía disponible. Se busca ordenar el conocimiento existente, resaltar perspectivas relevantes, identificar puntos de controversia y señalar rutas posibles de desarrollo. Se recomienda una estructura que incluya introducción, desarrollo temático y conclusiones.

La revista enfoca su labor editorial en la publicación de artículos de investigación, reflexión y revisión, por considerarlos los más relevantes para fortalecer el conocimiento en el campo de la ingeniería. Es una publicación de acceso abierto, con periodicidad cuatrimestral, y solo recibe manuscritos originales e inéditos.

Todos los textos enviados pasan por una evaluación rigurosa, hecha por pares académicos y por el Comité Editorial, con el objetivo de garantizar su calidad, pertinencia y contribución al desarrollo científico y tecnológico. Los artículos se deben ajustar a las normas de citación y referencias del *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA)* (7ª ed.).

En el marco de esta nueva etapa editorial, los artículos se deben enviar exclusivamente a través de la plataforma Open Journal Systems (OJS), a la cual se puede acceder desde el sitio web oficial de la revista:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Para completar el proceso de envío, el autor o autora debe:

- Registrarse como usuario en la plataforma OJS.
- Diligenciar la información completa del manuscrito y los autores.
- Adjuntar el archivo del artículo en formato editable, conforme a las normas de presentación de la revista.
- Aceptar la declaración de originalidad y cesión de derechos.
- Verificar que todas las secciones del envío estén completas antes de finalizar el proceso.

Así mismo, el manuscrito debe tener las siguientes normas de presentación:

- Un máximo de 20 páginas, en formato Word, escrito a una columna, interlineado de 1.5, con fuente Georgia de 11 puntos.
- Las citas y referencias deben seguir las normas y lineamientos que aparecen en el *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA)* (7ª ed.).
- Las gráficas y tablas deben ser editables. Se recomienda anexar los archivos originales y nombrarlos de manera clara (por ejemplo: Figura_1.xlsx, Tabla_2.docx), indicando el número correspondiente en el texto.

Para más información o consultas editoriales, se puede comunicar al correo monica.suarez@escuelaing.edu.co.

Scope and Policies

The main goal of *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is to be a means to divulge technical and scientific knowledge which contributes to the development of the country. We seek to publish high-quality rigorous works which help discuss and advance in different fields of engineering with a critical, proactive, and interdisciplinary approach.

Our journal prioritizes three types of contributions to strengthen its visibility and projection in national and international scientific communities:

- **Scientific and technological research article.** This type of paper shows, in detail, original results derived from research projects. It is usually structured in four sections: introduction, methodology, results, and conclusions. The introduction states the problem, justifies its importance, sets up the objectives, and includes a literature review. The methodology shows the study design, the tools and techniques used, and validity criteria. The results show their findings in a straightforward way, usually supported tables, charts, and figures. Finally, the conclusions interpret the data obtained, discuss their impact, and may include suggestions for future research. This type of article must be grounded on verifiable information, respect ethical principles, and be appropriately cited and quoted. Their length oscillates between 5,000 and 8,000 words.
- **Reflection article.** This is a document resulting from a research or academic process in which the author develops a critical, interpretive, or propositional analysis on a particular topic. Through an argued stance, supported by theoretical sources and experiences, the author constructs a personal yet rigorous perspective on the subject. The article's structure includes a clear introduction, a thematic development with a reflective approach, and a conclusion that synthesizes key contributions, reaffirms the author's position, and suggests potential lines of inquiry. The suggested length is between 3,000 and 6,000 words.
- **Review article.** This type systematically compiles and analyzes published or unpublished research findings to identify advances, debates, trends, and gaps in a specific field of science or technology. It is not merely a compilation of sources but a critical integration that proposes new perspectives or research directions. Its structure includes an introduction, search criteria and methods, thematic analysis, discussion, and conclusions. A thorough and well-documented literature review is required, with a length between 6,000 and 10,000 words.

In addition to these three main types, the journal considers other forms of academic contributions, such as:

- **Short article.** Presents preliminary or partial results from ongoing research that, due to their relevance or novelty, require early dissemination. It is a concise document (2,000–3,000 words) with

precise writing and a basic structure: introduction, summarized methodology, results, and initial conclusions.

- **Case report.** It provides a detailed analysis of a specific situation, technical experience, or methodological intervention to share lessons learned and reflections applicable to similar contexts. Common in applied fields such as engineering, health, education, or public management. It includes a case description, critical analysis, and discussion of implications.
- **Topic review.** Unlike a systematic review article, this type offers a critical and structured examination of a specific topic without attempting to cover all available literature. It aims to organize existing knowledge, highlight relevant perspectives, identify points of controversy, and suggest development paths. The recommended structure includes an introduction, thematic development, and conclusions.

The journal focuses its editorial efforts on publishing research, reflection, and review articles, as they are considered the most relevant for advancing knowledge in the field of engineering. It is an open-access publication with a quarterly frequency and only accepts original, unpublished manuscripts.

All submitted texts undergo a rigorous peer-review process by academic peers and the Editorial Committee to ensure quality, relevance, and contribution to scientific and technological development. All articles must adhere to the citation and reference guidelines of APA style (7th edition).

As part of this new editorial phase, article submissions must be made exclusively through the Open Journal Systems (OJS) platform, accessible via the journal's official website:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

To complete the submission process, authors must:

- Register as a user on the OJS platform.
- Complete all manuscript and author information.
- Attach the article file in an editable format, following the journal's submission guidelines.
- Accept the originality statement and copyright transfer.
- Verify that all submission sections are complete before finalizing the process.

Manuscript formatting guidelines:

- The document must not exceed 20 pages, in Word format, single-column, 1.5 line spacing, with 11-point Georgia font.
- Citations and references must follow APA style (7th edition).
- Graphs and tables must be editable. Original files should be attached and clearly labeled (e.g., Figure_1.xlsx, Table_2.docx), with corresponding numbering in the text.
- For further information or editorial inquiries, please contact: monica.suarez@escuelaing.edu.co