



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Evaluación del impacto de fenómenos climáticos extremos en los precios de mercado eléctrico guatemalteco

Autor: Irina Michelle Siguil Palacios

Tutor: Yolanda Sola y Cristian Fábrega

Curso Académico: 24-25

Máster en Energías Renovables y
Sostenibilidad Energética

ÍNDICE

I.	Listado de figuras	3
II.	Listado de tablas.....	5
III.	Agradecimientos	6
IV.	Resumen.....	7
V.	Abstract	7
1.	Introducción	9
2.	Contextualización.....	10
2.1	Contexto social y económico de Guatemala.....	10
2.2	Estado del Clima en Guatemala.....	10
2.3	Fenómeno de El Niño y La Niña	11
2.4	Mercado Eléctrico Guatemalteco.....	13
3.	Objetivos	14
3.1	Objetivo general.....	14
3.2	Objetivos específicos	14
4.	Metodología	15
4.1	Recopilación y tratamiento de datos climáticos.....	15
4.2	Índice ENSO (ONI)	15
4.3	Datos del sistema eléctrico nacional	15
4.4	Organización de datos y estructura temporal	15
4.5	Análisis estadístico	16
4.6	Matriz de correlación multivariable.....	16
4.7	Visualización y herramientas.....	16
5.	Resultados	16
5.1	Análisis climático	16
5.2	Análisis de Generación de energía y eventos ENSO	20
5.3	Análisis de demanda y Precio de Oportunidad de Energía (POE).....	29
5.4	Diversificación de mix energético	33
6.	Conclusiones	35
7.	Referencias	37
8.	Anexos.....	39
8.1	Glosario.....	39
8.2	Tablas y figuras de referencia.....	40

I. Listado de figuras

Figura 1: Mapa de regiones climáticas de Guatemala y estaciones Meteorológicas (INSIVUMEH, 2018).	11
Figura 2: Mapa de vertientes hidrológicas de Guatemala y estaciones hidrométricas (INSIVUMEH, 2018).	11
Figura 3: Representación del fenómeno de La Niña y El Niño (Castellanos, 2019).	12
Figura 4: Serie temporal de precipitación mensual promedio de estaciones meteorológicas y serie temporal ONI (datos meteorológicos por INSIVUMENH y el índice por NOAA, 2025). Los recuadros naranjas destacan períodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.	18
Figura 5: Diagramas de caja y bigotes de precipitación media acumulada de las clasificaciones ENSO segmentado por época. El eje y se ha ajustado al rango de valores de precipitación de las épocas lluviosa y seca, respectivamente, para poder apreciar mejor las diferencias entre fases ENSO.	20
Figura 6: Anomalía normalizada de temperatura máxima promedio (periodo de referencia 1981-2010) elaboración propia (datos históricos climáticos de INSIVUMENH, 2025).	20
Figura 7: Serie temporal de generación hidroeléctrica y serie temporal ONI (datos de generación por AMM y el índice por NOAA, 2025) Los recuadros naranjas destacan períodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.	21
Figura 8: Diagramas de caja y bigotes de generación hidroeléctrica media acumulada de las clasificaciones ENSO segmentado por época.	23
Figura 9: Comportamiento anual de generación hidroeléctrica en años de interés (datos de AMM, 2025)	24
Figura 10: Evolución de generación hidroeléctrica y térmica representativa con serie temporal de ONI (datos de generación por AMM y el índice por NOAA, 2025) Los recuadros naranjas destacan períodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.	24
Figura 11: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) tomando toda la serie temporal	25
Figura 12: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) época seca.	26
Figura 13: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) época lluviosa.	26
Figura 14: Evolución de generación eléctrica por tipo de combustible desde 2013 a 2024 (datos de AMM, 2025) la incorporación del coque de petróleo fue en 2018 por lo que la serie comienza en dicho año.	27
Figura 15: Evolución de potencia efectiva anual hidráulica y térmica (elaboración propia con datos AMM, 2025).	28
Figura 16: Evolución de potencia efectiva anual por tipo de tecnología renovable no convencional (elaboración propia con datos AMM, 2025)	28
Figura 17: Comportamiento histórico de demanda y crecimiento de la demanda anual desde 2000 a la actualidad (datos de AMM, 2025).	29
Figura 18: Evolución de Precio de Oportunidad de Energía o Spot en diferentes bandas y valor ONI (datos precio AMM y datos ONI de NOAA, 2025).	30
Figura 19: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad promedio de Energía	31
Figura 20: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad de Energía en banda valle	32

Figura 21: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad de Energía en banda valle	33
Figura 22: Evolución de generación de energía eléctrica por tipo de combustible en Guatemala	40
Figura 23: Serie temporal de precipitación mensual en diferentes estaciones meteorológicas y serie temporal ONI.....	41

II. Listado de tablas

Tabla 1: Distribución de participantes al 2025 en el mercado eléctrico guatemalteco	13
Tabla 2: Estaciones meteorológicas convencionales INSIVUMEH de interés	17
Tabla 3: Eventos de El Niño y La Niña de interés desde 2009 hasta la actualidad.....	17
Tabla 4: Análisis de correlación de Pearson entre el índice ONI y la precipitación media anual aplicado a la serie completa y la precipitación media anual acumulada por época climática	18
Tabla 5: Análisis ANOVA de precipitación media acumulada entre diferentes clasificaciones ENSO	19
Tabla 6: Análisis de correlación de Pearson entre el índice ONI y la generación hidroeléctrica, aplicado a la serie completa y segmentado por época climática	22
Tabla 7: Análisis ANOVA de generación acumulada media entre diferentes clasificaciones ENSO	22
Tabla 8: Mayores plantas de generación hidroeléctrica de Guatemala (MEM, 2014)	40
Tabla 9: Generación y participación por tipo de recurso en 2024 en Guatemala.....	41

III. Agradecimientos

A la vida por darme la oportunidad de cumplir uno de mis mayores sueños, permitirme vivir en una de las mejores ciudades del mundo, conocer otras culturas, otra forma de vivir y llevarme a lugares hermosos.

A mi padre y a mi madre por su amor, apoyo incondicional, por siempre acompañarme en cada aventura y mostrarme que el amor trasciende el tiempo y la distancia.

A mi hermano por ser mi mejor amigo y sacarme una sonrisa a pesar de estar del otro lado del mundo.

A mis abuelas porque cada decisión y sacrificio que tomaron por amor a la familia permitieron que yo lograra ser la mujer que soy hoy. Gracias por cada oración que hicieron para mí.

A mis abuelos porque a pesar de que no los puedo llamar para contarles, sé que me están viendo y que me acompañaron y cuidaron todo el tiempo.

A mi familia y mis amigos que extrañé tanto y que estuvieron pendientes de mí siempre.

A Fundación Carolina por esta oportunidad de crecer profesional y personalmente, por todo el apoyo, las experiencias y las amistades que este programa me dejó. Gracias por confiar en mí y apostar por mi capacidad para ayudar a mi país.

A mis amigos del máster que fueron mi familia en Barcelona y mi apoyo en los buenos y malos momentos.

A Yolanda y a Cristian por su guía y por compartir su conocimiento conmigo para la realización de este trabajo.

Finalmente, dedico este trabajo a mi padre que siempre me impulsó a soñar en grande, a salir de mi zona de confort y querer conocer el mundo entero. Dedico este trabajo a mi madre porque ella me enseñó con el ejemplo a ser una mujer fuerte, independiente y valiente. Gracias por hacerme sentir su amor y apoyo a pesar de estar a 9,000 kilómetros. Pase lo que pase, esté donde esté, José Luis, Lorena y Alejandro, ustedes siempre serán mi hogar.

IV. Resumen

Este trabajo analiza el impacto de fenómenos climáticos extremos, específicamente los episodios más fuertes de El Niño y La Niña, dos fases opuestas del patrón climático El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), en el comportamiento del mercado eléctrico guatemalteco. Guatemala, por su alta dependencia de recursos hídricos y su ubicación geográfica, es un país particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático, lo que se refleja en la sensibilidad de su sistema eléctrico ante eventos climáticos extremos. A través de un enfoque cuantitativo y estacional, se evaluó la relación entre el índice de El Niño oceánico (ONI) y variables climáticas (precipitación y temperatura) en zonas clave de generación hidroeléctrica, así como su efecto sobre la generación eléctrica, el precio de oportunidad de energía (POE) y la participación de tecnologías térmicas.

Los resultados muestran que durante eventos El Niño (fase cálida), la reducción de precipitación en época lluviosa provoca una disminución significativa de la generación hidroeléctrica, la cual es compensada por un aumento en la generación térmica, especialmente con búnker y carbón, lo que eleva los precios del mercado. En contraste, durante los eventos La Niña (fase fría), se observó un incremento en la generación hidroeléctrica, lo que permitió una menor dependencia de fuentes fósiles y una estabilización de precios. Esta dinámica evidencia una relación inversa entre la disponibilidad hídrica y el POE, más marcada durante las horas de mayor demanda.

El estudio también reveló la sensibilidad del POE a variables como el precio internacional del búnker, la demanda nacional y la generación térmica total, lo que refuerza la exposición del sistema a factores externos. A pesar del alto potencial renovable del país, la limitada diversificación energética y la dependencia de combustibles fósiles importados acentúan la vulnerabilidad estructural del sistema eléctrico. En este contexto, se concluye que es imprescindible impulsar una transición energética orientada a fortalecer la resiliencia del sistema mediante la incorporación de fuentes renovables no convencionales, tecnologías de almacenamiento y una planificación energética sostenible.

V. Abstract

This study analyzes the impact of extreme climatic events, specifically the most intense episodes of El Niño and La Niña, the two opposing phases of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) climate pattern, on the behavior of the Guatemalan electricity market. Due to its high reliance on hydropower resources and its geographic location, Guatemala is particularly vulnerable to the effects of climate change, a reality reflected in the sensitivity of its power system to extreme weather events. Through a quantitative and seasonal approach, this work evaluates the relationship between the Oceanic Niño Index (ONI) and key climate variables (precipitation and temperature) in strategic hydroelectric generation zones, as well as their impact on electricity generation, the opportunity price of energy (POE), and the share of thermal technologies.

The results show that during El Niño events (warm phase), reduced rainfall during the rainy season leads to a significant drop in hydroelectric generation. This reduction is offset by increased thermal generation, especially from bunker fuel and coal, which drives market prices upward. In contrast, during La Niña events (cold phase), an increase in hydroelectric output was observed, allowing for reduced dependence on fossil fuels and greater price stability. This dynamic reveals an inverse relationship between water availability and the POE, particularly during peak demand hours.

The study also found that the POE is sensitive to variables such as international bunker prices, national electricity demand, and total thermal generation, highlighting the system's exposure to external factors. Despite Guatemala's high renewable energy potential, the limited diversification of its energy mix and the dependency on imported fossil fuels exacerbate the structural vulnerability of the electricity sector. In this context, the study concludes that promoting an energy transition aimed at strengthening system resilience is essential, through the integration of non-conventional renewable sources, energy storage technologies, and sustainable energy planning.

1. Introducción

El cambio climático ha alterado significativamente los patrones climáticos a nivel global, provocando una mayor frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como sequías prolongadas, lluvias intensas u olas de calor (IPCC, 2023). Esta nueva dinámica climática afecta directamente la disponibilidad de los recursos naturales de los que depende una parte sustancial de la generación de energía eléctrica, particularmente en países con matrices energéticas fuertemente apoyadas en fuentes renovables como el agua, el viento o la radiación solar. En este contexto, los sistemas eléctricos enfrentan desafíos crecientes para mantener la estabilidad del suministro, asegurar precios competitivos y reducir su exposición a riesgos climáticos, operativos y económicos.

En Guatemala, estas vulnerabilidades se acentúan debido a su ubicación geográfica y a la alta participación de la generación hidroeléctrica en el mix energético nacional. Si bien esta fuente representa una opción limpia y económica, su dependencia directa del régimen de precipitaciones convierte al sistema en altamente sensible ante la variabilidad climática. En este escenario, los fenómenos asociados a El Niño–Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) se convierten en un factor determinante para la planificación y operación del sistema eléctrico (INSIVUMEH, 2018). El análisis de estos fenómenos y su impacto sobre variables clave como la generación eléctrica, los precios de mercado y la demanda resulta esencial para entender la vulnerabilidad estructural del sistema eléctrico guatemalteco.

Este trabajo propone un enfoque integral y cuantitativo que combina análisis de series temporales climáticas, como precipitación, temperatura y fase de ENSO, con variables energéticas, como generación por tipo de fuente, precios de mercado, demanda y capacidad instalada. A través de correlaciones, análisis por época estacional (seca y lluviosa), y estudios de varianza, se busca evidenciar cómo los eventos climáticos extremos afectan el comportamiento del mercado eléctrico y qué tecnologías fungen como respaldo ante la disminución de la generación hidroeléctrica. Adicionalmente, se examinan los factores económicos, operativos y estructurales que condicionan el comportamiento del Precio de Oportunidad de Energía (POE).

Finalmente, con los resultados obtenidos se busca destacar la importancia estratégica de la diversificación del mix energético. A pesar del alto potencial renovable del país (solar, eólico, geotérmico y aún hidroeléctrico sin explotar), la participación de fuentes renovables no convencionales sigue siendo marginal. Esto evidencia una oportunidad y una necesidad urgente de avanzar hacia una matriz más resiliente, menos dependiente del clima y de los combustibles fósiles importados, capaz de enfrentar con mayor solidez los desafíos energéticos del presente y del futuro (AGER, 2024).

2. Contextualización

2.1 Contexto social y económico de Guatemala

Guatemala enfrenta desafíos sociales, económicos y energéticos complejos que condicionan el desarrollo de su población. Según la última Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI 2023) realizada por el Instituto Nacional de Estadística, un 56% de la población vive en condiciones de pobreza, con un 16.2% en situación de pobreza extrema. La brecha entre áreas rurales y urbanas es significativa, mostrando que la mayor parte de la población en situación de pobreza se encuentra en áreas rurales siendo en su mayoría comunidades indígenas, las más afectadas (INE, 2024). En el ámbito energético, el país cuenta actualmente con un porcentaje de electrificación aproximado del 90%, indicando que aún existe aproximadamente un millón de guatemaltecos sin acceso a electricidad, vital para el desarrollo humano. Siendo las comunidades rurales las que presentan el menor porcentaje de electrificación representando aproximadamente un 82% (BID, 2025).

Estas y otras variables socioeconómicas como crecimiento poblacional, desnutrición, desigualdad, analfabetismo entre otras hacen que Guatemala se considere una zona altamente vulnerable y con mayor exposición ante eventos climáticos extremos. Todo esto dificulta en gran medida que la población pueda prepararse, adaptarse y afrontarse a los efectos negativos del cambio climático. Sumado al hecho que, por las características topográficas y posición geográfica, Guatemala cuente con alta variabilidad climática viéndose afectada más frecuentemente por eventos climáticos extremos como sequías y huracanes, incrementados por el efecto de cambio climático (Castellanos, 2019).

Esto se ha evidenciado en el comportamiento histórico de la temperatura, ya que se muestra una clara tendencia al incremento. En los últimos 20 años, la temperatura media se ha incrementado en 0.8 °C. Además, el cambio climático ha alterado los patrones de precipitaciones en el país, provocando periodos de sequía más prolongados y lluvias más intensas en periodos cortos de tiempo. Esto ha afectado a la disponibilidad de agua tanto para consumo humano y riego como para la generación de energía hidroeléctrica a largo plazo. Las sequías causan escasez y las lluvias intensas, inundaciones (MARN, 2024).

2.2 Estado del Clima en Guatemala

Las características topográficas y la posición geográfica de Guatemala ocasionan que cuente con una gran cantidad de microclimas y alta variabilidad climática. El país se localiza en el extremo norte de Centroamérica, entre las latitudes 13°44'N y 17°49'N y las longitudes 88°13'O y 92°13'O, lo cual lo sitúa en una zona tropical, pero con fuertes influencias altitudinales y oceánicas. El clima en Guatemala está influenciado por los regímenes de vientos del noreste, la humedad proveniente del mar Caribe y el Golfo de México, y los regímenes de viento del suroeste, la humedad del Océano Pacífico. El conjunto de estos vientos y otros factores climáticos definen los periodos lluviosos, frentes fríos, olas de calor, entre otros. Las cuatro estaciones normalmente marcadas en el latitudes medias y altas no se presentan de la misma forma en Guatemala, por lo que realmente solo se delimitan dos épocas importantes: época lluviosa (de mayo a octubre) y época seca (noviembre a abril) y de esta forma se define el año estacional en el país (INSIVUMEH, 2018).

Lo mencionado anteriormente son características generales de clima en Guatemala. Sin embargo, el país presenta una amplia diversidad de clasificación climática. En 2008 el INSIVUMEH, estableció la presencia de 23 tipos de clima en Guatemala de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, basada en precipitación y evapotranspiración. Y se designó 8 regiones climáticas de Guatemala que se encuentran distribuidas tal y como se muestra en la Figura 1 donde se considera las diferencias climáticas entre regiones de planicie, laderas, depresiones orográficas, valles, tierras altas y complejos volcánicos (Castellanos, 2019).

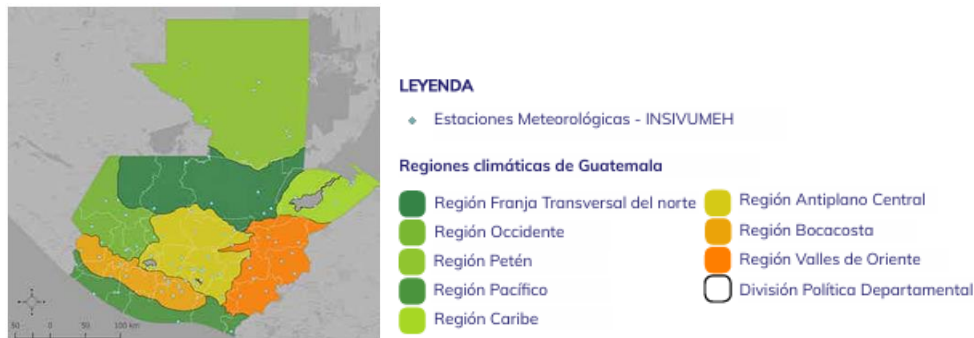


Figura 1: Mapa de regiones climáticas de Guatemala y estaciones Meteorológicas (INSIVUMEH, 2018).

En cuanto a hidrología, Guatemala cuenta con tres vertientes. La vertiente al Pacífico con 18 cuencas altamente influenciadas por la precipitación, vertiente al Caribe con 10 cuencas caracterizadas por ser tener los ríos más extensos y vertiente al Golfo de México con 10 cuencas caracterizadas por tener los ríos más caudalosos las cuencas principales se muestran en la Figura 2 (Castellanos, 2019).



Figura 2: Mapa de vertientes hidrológicas de Guatemala y estaciones hidrométricas (INSIVUMEH, 2018).

La región Centroamericana es fuertemente influenciada por los dos océanos que la rodean, el Pacífico y el Atlántico. El océano Pacífico tiene un papel predominante en la regulación del clima global. Por lo que las perturbaciones con la atmósfera tienen efectos notorios sobre el planeta. Una de las fuentes más reconocidas y estudiadas que influyen en el clima en Guatemala es el Fenómeno de El Niño y la Niña o El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) (Castellanos, 2019).

2.3 Fenómeno de El Niño y La Niña

El Fenómeno de El Niño y La Niña o El Niño Oscilación del Sur consiste en la oscilación de los parámetros de la temperatura del agua superficial presentada cada cierto número de años en el océano Pacífico Ecuatorial el cual está asociado también a un fenómeno de cambio de presión atmosférica conocido como Oscilación del Sur. Ambos fenómenos tienen una relación estrecha debido a la circulación entre el océano y la atmósfera (Castellanos, 2019).

Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) durante condiciones normales en el océano Pacífico, los vientos alisios soplan hacia el oeste a lo largo del ecuador, llevando el agua cálida desde Sudamérica hasta Asia. Por diferencia de densidades y para reemplazar esa agua cálida, agua fría asciende desde las profundidades, un proceso denominado surgencia, tal y como muestra la Figura 3. El Niño y La Niña son dos patrones climáticos opuestos que alteran estas condiciones normales, siendo el primero un calentamiento inusual y el segundo, un enfriamiento (Figura 3). Tanto El Niño como La Niña pueden tener impactos en el clima a escala global, ocasionar incendios forestales, los ecosistemas y las economías. Los episodios de El Niño y La Niña suelen durar de nueve a doce meses, pero a veces pueden durar años. Los eventos de El Niño y La Niña ocurren cada dos a siete años, en promedio, pero no presentan una prioridad fija y hasta el momento los episodios de El Niño han sido más frecuentes que los de La Niña. (NOAA, 2023).

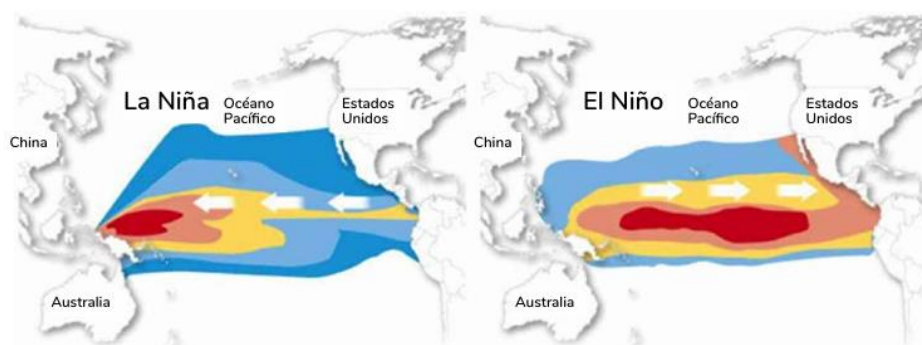


Figura 3: Representación del fenómeno de La Niña y El Niño (Castellanos, 2019).

Durante El Niño, los vientos alisios se debilitan, el agua cálida se desplaza hacia el este, hacia la costa oeste de América. Mientras que durante La Niña se observa el efecto opuesto de El Niño. Durante los eventos de La Niña, los vientos alisios son aún más fuertes de lo habitual, transportando más agua cálida hacia Asia (NOAA, 2023). Para cuantificar estos cambios de presión atmosférica y temperatura superficial del mar (TSM) se creó el indicador oficial llamado Índice de Oscilación del Sur (IOS) o más comúnmente llamado Oceanic Niño Index (ONI) con el fin de monitorear y clasificar los eventos del ENSO, este valor representa el promedio móvil de tres meses de las anomalías de la TSM en la región Niño 3.4, definida por las coordenadas 5°S-5°N, 120°O-170°O. Un evento El Niño se define cuando el ONI es igual o superior a +0.5 °C durante cinco trimestres móviles consecutivos, mientras que un evento La Niña ocurre cuando el ONI es igual o inferior a -0.5 °C durante el mismo periodo (NOAA Climate Prediction Center, 2023).

El fenómeno ENSO afecta especialmente a regiones centroamericanas y suramericanas específicas cercanas al mar Pacífico como Colombia y Ecuador. En cuanto a Guatemala, el fenómeno de El Niño trae condiciones más secas y La Niña condiciones de mayor precipitación. El Niño generalmente se manifiesta con altas temperaturas antes del inicio de la temporada de lluvias, canículas severas, también puede producir un déficit o exceso de lluvias en las vertientes del Caribe y Pacífico, e irregularidad en el establecimiento y distribución en temporada de lluvias. Por el contrario, el fenómeno de La Niña se encuentra más relacionado con excesos de lluvias y eventos hidrometeorológicos extremos (Castellanos, 2019).

2.4 Mercado Eléctrico Guatemalteco

El mercado eléctrico de Guatemala funciona como un mercado libre desde 1996, momento en el que las actividades de la industria eléctrica se separaron permitiendo la libre competencia en dos sectores importantes como la generación y la comercialización de energía. La distribución y la transmisión funcionan como actividades reguladas donde participan tanto empresas privadas como públicas para prestar el servicio y son otorgadas por licitación pública (AMM, 2025).

El funcionamiento del mercado se realiza por instituciones públicas y privadas, dentro del sector público tenemos al Ministerio de Energías y Minas (MEM), con función de dictar la Política Energética. Dentro de este Ministerio encontramos el órgano técnico llamado Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) que corresponde al ente regulador del mercado, especialmente en actividades de transmisión y distribución. Luego en la esfera privada tenemos al operador del sistema y del mercado que funcionan como una sola empresa privada sin fines de lucro denominada Administrador de Mercado Mayorista que se encarga de la operación del sistema eléctrico, la liquidación de transacciones y viabiliza espacio de operaciones de compra y venta de energía, potencia o productos derivados (AMM, 2025).

Por último, los agentes se definen como los Generadores, Distribuidores, Transportistas y los Comercializadores. Adicionalmente se consideran participantes del mercado a los Grandes Usuarios consumidores que son aquellos con demanda mayor a 100 kW, estos pueden realizar compras directas a los comercializadores o generadores para cubrir su demanda. Además, existe la figura de Generadores Distribuidos Renovables (GDR) que son centrales con potencia menor a 5MW. Actualmente el mercado está distribuido según lo descrito en la Tabla 1.

Tabla 1: Distribución de participantes al 2025 en el mercado eléctrico guatemalteco

Participante	Cantidad
Generadores	63
GDR	64
Comercializadores	36
Distribuidores	3
Transportistas	15
Grandes Usuarios	1410

(AMM, 2025).

El mercado eléctrico guatemalteco es un mercado de costos, por lo que la asignación de los productos energéticos se realiza conforme al Costo Variable de Generación (CVG) declarado por las centrales generadoras conectadas al Sistema Nacional Interconectado (SNI). El mercado de oportunidad de la energía se programa diariamente (mercado de día anterior) preservando el principio de ser un mercado de costos. Las centrales generadoras deben presentar información periódica de su CVG, lo cual se utiliza para realizar una lista de mérito hasta cubrir la demanda del SNI, reservas y compromisos internacionales. Este mercado es optimizado mediante un despacho económico que consiste en utilizar la oferta disponible (energía y potencia) para abastecer la demanda prevista (energía y potencia) en un periodo determinado minimizando el costo total de operación. Cada hora se optimiza el despacho de generación, donde uno de sus resultados es el Precio de Oportunidad de la Energía (POE) o precio Spot, determinado a través del CVG de la unidad generadora marginal (la última central generadora necesaria para cubrir la demanda y reservas del SNI) (AMM, 2025).

Históricamente el mix energético de Guatemala ha caracterizado por una alta participación de generación de fuentes renovables, casi totalitariamente por generación por hidroeléctricas debido a la disponibilidad de recurso hídrico distribuido a largo del territorio nacional. Esta fuente ha constituido un pilar central en el suministro eléctrico en las últimas décadas llegando hasta un 53% del mix energético en 2022, con valores normales de participación entre el 35-50% de generación anual del país. Sin embargo, para suplir la demanda también se cuenta con generación térmica utilizando principalmente combustibles de fuentes fósiles como el carbón, bunker (fuel oil) y en los últimos años se ha aumentado la inclusión del coque de petróleo (MEM, 2024) (consultar Figura 22 en Anexo 8.2).

Una particularidad del sistema eléctrico guatemalteco es que se cuenta con cogeneración con biomasa. En Guatemala se cuenta con alta producción de caña de azúcar y durante el procesamiento para la producción de azúcar, se genera alta cantidad de residuos de biomasa (bagazo). Esta biomasa es aprovechada energéticamente por lo que hay unidades térmicas que funcionan en dos periodos al año, durante el periodo de zafra (cosecha de caña y producción de azúcar) funcionan con biomasa y durante periodo de no zafra (plantación y crecimiento de caña) funcionan con combustibles de fuente fósil. Desde el punto de vista del mercado guatemalteco, la generación de energía con biomasa se considera renovable (MEM, 2024).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Evaluar el impacto de fenómenos climáticos extremos en el mercado eléctrico guatemalteco para determinar la vulnerabilidad del mercado y el rol que juega la diversificación del mix energético para la resiliencia

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento de la precipitación y temperatura en las zonas de mayor generación de energía por hidroeléctricas en eventos ENSO importantes.
- Evaluar el comportamiento de la generación y precios de energía en eventos climáticos extremos (fenómenos ENSO)
- Determinar la relación estadística entre las variables de precipitación, la generación y los precios de energía en eventos climáticos extremos

Este trabajo se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por la Agenda 2030, contribuyendo de manera directa al ODS 7: Energía asequible y no contaminante, al analizar la resiliencia del sistema eléctrico guatemalteco y promover la diversificación hacia fuentes renovables. Asimismo, se vincula con el ODS 13: Acción por el clima, dado que estudia el impacto de fenómenos climáticos extremos como El Niño y La Niña en la seguridad energética del país, reforzando la importancia de la adaptación climática en la planificación del sector eléctrico en los países en vías de desarrollo, siendo estos los más vulnerables al cambio climático.

4. Metodología

Este estudio adopta un enfoque mixto, combinando técnicas cuantitativas descriptivas y correlacionales, con un componente cualitativo de análisis contextual, para evaluar el impacto de fenómenos climáticos extremos (El Niño y La Niña) sobre el mercado eléctrico guatemalteco. El análisis se centra particularmente en la generación hidroeléctrica y los precios de la energía, considerando también otras variables del sistema eléctrico nacional.

4.1 Recopilación y tratamiento de datos climáticos

Se utilizaron series temporales mensuales de temperatura máxima y precipitación mensual acumulada, obtenidas del sistema ENCANTS del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH, s.f.), abarcando el periodo 1980–2024, con énfasis en la última década. Además, para el análisis de temperatura, se calculó la anomalía estandarizada tomando como periodo de referencia 1981–2010, según las recomendaciones de la World Meteorological Organization tal y como muestra la Ecuación 1 (WMO, 2021).

Ecuación 1: Anomalía climática estandarizada

$$\text{Anomalía mes } n = \frac{\text{Dato mes } n - \text{Promedio ref } 1980 - 2010}{\text{desv. est } 1981 - 2010}$$

Donde:

Dato mes n= Temperatura máxima el mes y año n

Desv.est ref 1980-2010= desviación estándar de temperatura máxima del periodo de referencia 1980-2010.

4.2 Índice ENSO (ONI)

Como indicador del fenómeno ENSO, se empleó el Oceanic Niño Index (ONI), obtenido del Climate Prediction Center (NOAA, 2025). Para asignar un valor mensual, se utilizó el valor del trimestre móvil correspondiente al mes central (por ejemplo, el trimestre DJF se asigna a enero), con el fin de construir una serie temporal continua de referencia climática.

4.3 Datos del sistema eléctrico nacional

Se recopilaron datos mensuales de generación eléctrica desglosados por tipo de fuente (hidráulica, térmica, renovables no convencionales), así como por tecnología y tipo de combustible (búnker, carbón, coque de petróleo). También se incluyó información sobre capacidad instalada efectiva por tipo de recurso, precios de mercado eléctrico (precio spot o POE, bandas de valle y punta), demanda eléctrica total y máxima, importaciones y exportaciones, y costos marginales por tecnología. Estos datos fueron obtenidos principalmente de los registros del Administrador del Mercado Mayorista (AMM, s.f.), el Ministerio de Energía y Minas (MEM, s.f.) y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE, s.f.).

4.4 Organización de datos y estructura temporal

Toda la información fue estructurada con frecuencia mensual y anual, y se diferenciaron dos épocas climáticas estacionales: época seca (noviembre–abril) y época lluviosa (mayo–octubre),

atendiendo a la estacionalidad climática y operativa del país (INSIVUMEH, 2018). Esta clasificación fue aplicada especialmente para el análisis de la relación entre el fenómeno ENSO y variables como la generación hidroeléctrica o la precipitación.

4.5 Análisis estadístico

Se aplicaron análisis de correlación de Pearson para evaluar relaciones lineales entre las variables climáticas (ONI, precipitación, temperatura), de generación y de mercado eléctrico (POE, bandas de precio). Para identificar posibles diferencias en los valores medios de generación o precipitación entre clasificaciones ENSO (Niño, Neutro, Niña), se realizó un análisis de varianza (ANOVA de un factor), con un nivel de significancia de 0.05.

4.6 Matriz de correlación multivariable

Con el fin de identificar relaciones complejas entre múltiples variables del mercado eléctrico (generación, precios, demanda, combustibles fósiles), se construyó una matriz de correlación de Pearson y se evaluó la significancia estadística individual de cada relación. Se analizaron separadamente las correlaciones para el POE promedio, la banda de valle y la banda de punta.

4.7 Visualización y herramientas

El procesamiento de datos y visualización se realizó utilizando Python, especialmente para el tratamiento de series climáticas y construcción de gráficos. Microsoft Excel se utilizó para la estructuración de la base de datos principal, así como para los cálculos de correlación, tablas dinámicas y generación de gráficos complementarios. Las visualizaciones incluyeron diagramas de dispersión, diagramas de líneas, diagramas combinados, y de caja y bigotes.

5. Resultados

5.1 Análisis climático

Con el objetivo de evaluar el efecto de los fenómenos El Niño y La Niña sobre el comportamiento de la precipitación y la temperatura en Guatemala, se llevó a cabo un análisis de estas variables climáticas en cinco zonas estratégicas del país con alta presencia de generación hidroeléctrica. Para ello, se seleccionaron cinco estaciones meteorológicas convencionales del INSIVUMEH, considerando su cercanía geográfica a las plantas hidroeléctricas más importantes y su representatividad climática. A partir de los registros históricos disponibles, se construyeron series temporales de precipitación y temperatura máxima media, que posteriormente se analizaron en relación con los eventos ENSO identificados entre 2009 y 2024, según la clasificación de la NOAA basada en el índice ONI. Este análisis permitió observar patrones estacionales y anomalías asociados a los eventos climáticos extremos, así como determinar estadísticamente la magnitud de su impacto durante las épocas seca y lluviosa.

Para determinar las plantas de generación hidroeléctrica más importantes se utilizaron fuentes de información oficiales del Ministerio de Energía y Minas, se clasificó el listado por potencia instalada de las plantas y se obtuvo la ubicación de 5 plantas con mayor (MEM, 2014). La cual se puede consultar en el Anexo 8.2. Posteriormente se relacionó con las estaciones meteorológicas obteniendo así las cinco más representativas para filtrar los datos de precipitación. Se designó un

nombre a cada una de las estaciones según lo especificado en la Tabla 2, con fines de identificación en este trabajo.

Tabla 2: Estaciones meteorológicas convencionales INSIVUMEH de interés

ID ESTACIÓN	Latitud exacta (°)	Longitud exacta (°)	Nombre estación	Nombre designado
INS141901CV	15.357893	-90.661261	Chicamán, Quiché	Chixoy
INS161201CV	15.608429	-89.81227	Cahabón, Alta Verapaz	Alta Verapaz
INS141301CV	15.399247	-91.142084	Nebaj, Quiché	Quiché
INS050101CV	14.37377	-90.830533	Escuintla, Escuintla	Escuintla
INS090101CV	14.859902	-91.508073	Quetzaltenango, Quetzaltenango	Quetzaltenango

Con esta información, se filtró la base de datos para obtener las series temporales por ubicación (estación convencional) tanto de precipitación como de temperatura máxima de las 5 estaciones meteorológicas, a partir de las cuales se calculó el promedio para obtener un dato representativo de las 5 ubicaciones. Es importante mencionar que existe variabilidad entre los datos debido a los microclimas existentes en el país, sin embargo, para fines de este trabajo se utilizó el valor promedio como representativo de las precipitaciones de las ubicaciones de interés.

Por otro lado, se determinaron los periodos de interés del fenómeno El Niño y La Niña en función a la clasificación de la NOAA utilizando el índice ONI. Analizado la serie mensual del ONI, se destacó los periodos de interés para la evaluación en las series temporales de las otras variables de generación y de mercado como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Eventos de El Niño y La Niña de interés desde 2009 hasta la actualidad

Inicio	Final	ONI	Clasificación
Junio 2009	Mayo 2010	+1.5 a +1.9°C	Niño fuerte
Junio 2010	Diciembre 2011	$\leq -1.5^{\circ}\text{C}$	Niña Fuerte
Abril 2015	Abril 2016	$\geq +2.0^{\circ}\text{C}$	Niño muy fuerte
Octubre 2021	Octubre 2021	-1 a -1.5°C	Niña moderada
Mayo 2023	Abril 2024	+1.5 a +1.9°C	Niño fuerte

La Figura 4 muestra la serie temporal de la precipitación mensual promedio de las cinco estaciones representativas de zonas de generación hidroeléctrica más importantes del país, comparada con el índice ONI (para observar comportamiento de cada estación, consultar Figura 23 en Anexos 8.2). Los eventos El Niño se han resaltados en un recuadro de color naranja y los eventos La niña con recuadros azules. Se puede apreciar el comportamiento de la precipitación histórica desde enero de 2009 hasta diciembre de 2024, con un cierto patrón que coincide con mayores lluvias en los meses de mayo a octubre y una disminución de precipitación en los meses de noviembre a abril coincidente con la información brindada por el INSIVUMEH donde clasifica dos épocas importantes en el año en Guatemala, la época lluviosa y época seca (INSIVUMEH, 2018).

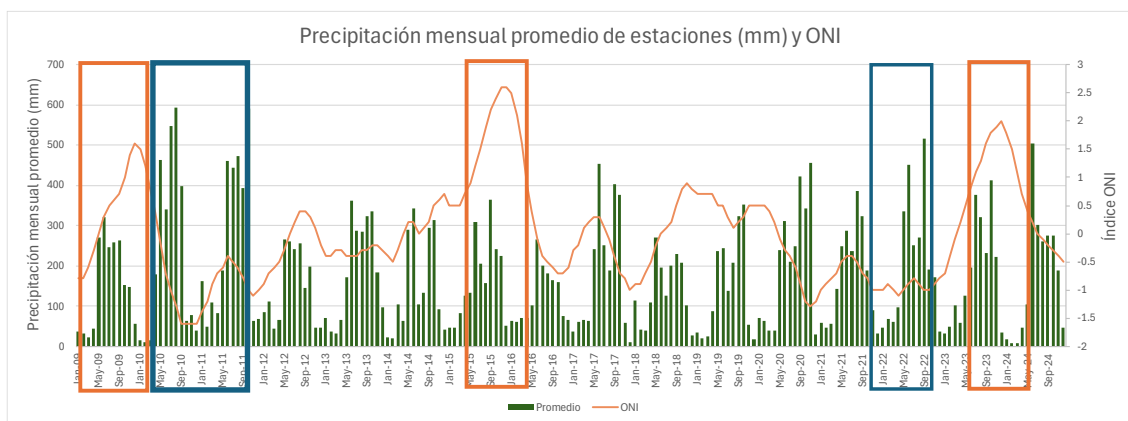


Figura 4: Serie temporal de precipitación mensual promedio de estaciones meteorológicas y serie temporal ONI (datos meteorológicos por INSIVUMENH y el índice por NOAA, 2025). Los recuadros naranjas destacan periodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.

En la Figura 4 vemos el comportamiento de la precipitación mensual media y los eventos ENSO de interés. Durante los eventos de El Niño (2009/2010, 2015/2016 y 2023/2024), se observa una disminución pronunciada de la precipitación, mientras que durante los eventos de La Niña (2010/2011 y 2021/2022) se presenta un incremento pronunciado. Este patrón sugiere una relación inversa entre el fenómeno ENSO y la precipitación media mensual.

Con el objetivo de determinar la relación estadística entre las variables de precipitación y los eventos climáticos extremos ENSO, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el índice ONI y la precipitación media mensual. Inicialmente, se aplicó la prueba sobre la serie temporal completa para identificar la relación directa entre las variables mencionadas. El resultado mostró una correlación débil y no significativa, como se indica en la Tabla 4, lo cual podría atribuirse a la influencia de la estacionalidad natural del clima guatemalteco. Para evaluar la significancia estadística de los resultados, se utilizó el valor p , que indica la probabilidad de que la correlación observada haya ocurrido por azar. Un valor p inferior a 0.05 se considera estadísticamente significativo, es decir, que hay evidencia suficiente para afirmar que existe una relación entre las variables analizadas (Field, 2018).

Por ello, considerando la fuerte estacionalidad climática del país, se procedió a realizar el análisis de forma segmentada por época climática, definiendo como época seca el período de noviembre a abril y como época lluviosa el de mayo a octubre, de acuerdo con el año estacional en el país (INSIVUMEH, 2018). Para cada año, se calculó la precipitación media estacional acumulada y el valor promedio del ONI correspondiente por época (Tabla 4).

Tabla 4: Análisis de correlación de Pearson entre el índice ONI y la precipitación media anual aplicado a la serie completa y la precipitación media anual acumulada por época climática

Época	Coefficiente de Pearson (r)	Valor p	Interpretación
Serie completa	-0.11	0.12	Correlación débil, no significativa
Lluviosa	-0.55	0.027	Correlación negativa moderada, significativa
Seca	-0.12	0.66	Correlación débil, no significativa

En la época lluviosa, se identificó una correlación negativa moderada y estadísticamente significativa, lo que indica que a mayor valor del ONI (condiciones El Niño), la precipitación

acumulada media tiende a disminuir. Esta relación refuerza la sensibilidad hidrológica a la variabilidad climática asociada al fenómeno ENSO en el país. Por el contrario, en la época seca, el coeficiente de Pearson fue bajo y no significativo, lo cual indica que no existe una relación lineal clara entre el ONI y la precipitación en ese período, posiblemente por la influencia de otros factores locales como canículas, frentes fríos entre otras.

Además, se realizó la prueba ANOVA (de un factor) para comparar la precipitación media acumulada entre las diferentes clasificaciones ENSO de la NOAA utilizando el ONI promedio para cada época y así determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los grupos (Tabla 5). El estadístico o factor F es el cociente entre la varianza entre grupos y la varianza dentro de los grupos, y permite evaluar si al menos una de las medias es significativamente diferente del resto. Un valor F elevado, acompañado de un valor p inferior a 0.05, sugiere que existen diferencias significativas entre los grupos comparados (Field, 2018).

Tabla 5: Análisis ANOVA de precipitación media acumulada entre diferentes clasificaciones ENSO

Época	Grupos estudiados	Factor (ANOVA)	F	Valor p	Diferencia estadística significativa
Lluviosa	Neutro, La Niña moderada, El Niño (incluyendo moderado y fuerte)	6.10		0.0135	Sí
Seca	Neutro, La Niña moderada, El Niño (incluyendo moderado y fuerte)	0.29		0.8336	No

Los resultados muestran que, durante la época lluviosa, sí existen diferencias estadísticamente significativas en la precipitación media acumulada asociadas al tipo de evento ENSO. Específicamente, los años clasificados como La Niña moderada presentan precipitaciones más altas, mientras que los años con condiciones El Niño registran valores más bajos. En cambio, durante la época seca, el ANOVA no detectó diferencias significativas entre los grupos, lo cual sugiere que en este período el fenómeno ENSO no tiene una influencia clara sobre la precipitación estacional congruente con el resultado de la Tabla 4.

Para visualizar el comportamiento de la precipitación media acumulada según las diferentes fases del ENSO, se elaboró los diagramas de caja y bigotes segmentados por época climática (Figura 5). En el caso de la época lluviosa, se observa una diferencia marcada entre las distribuciones de las distintas clasificaciones. Destaca la fase La Niña, que muestra valores de precipitación considerablemente más altos que las otras categorías. Por su parte, los años neutros presentan mayor dispersión y la presencia de valores atípicos, lo cual podría atribuirse a la influencia de otros fenómenos climáticos no asociados al ENSO, como huracanes, canículas o frentes fríos. En el caso de la clasificación El Niño, se unificaron las subcategorías de Niño moderado y Niño fuerte debido al número reducido de observaciones. Aunque esta clasificación presenta una precipitación media acumulada inferior a La Niña, no se observan diferencias claras respecto a los años neutros, lo que podría deberse a la limitación del tamaño muestral. Esto sugiere la necesidad de contar con una serie temporal más extensa para confirmar estadísticamente dicha tendencia.

Por otro lado, observando el diagrama de la época seca, no se observa una diferencia marcada entre las distribuciones de las distintas clasificaciones. Observamos en este caso contamos con mayor variabilidad de los datos en La Niña moderada y esto de igual forma, lo cual podría atribuirse también a la influencia de otros fenómenos climáticos no asociados al ENSO, como huracanes, canículas o frentes fríos. Estos resultados refuerzan la idea de que el efecto del ENSO

sobre la precipitación es más pronunciado durante la época lluviosa, mientras que en la época seca predominan otros factores locales y estacionales.

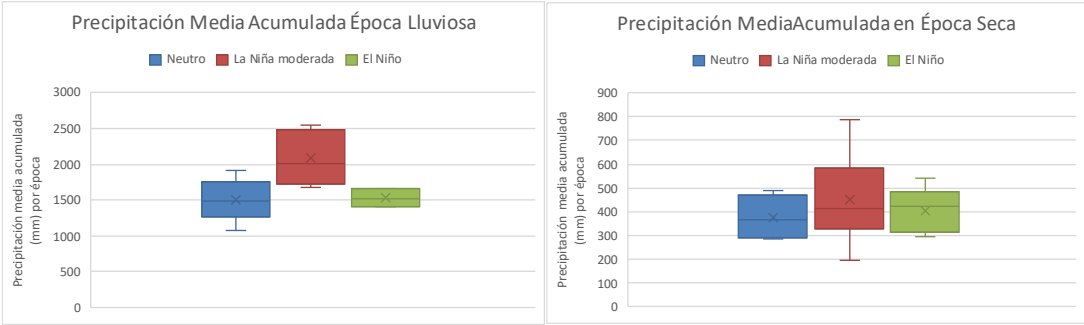


Figura 5: Diagramas de caja y bigotes de precipitación media acumulada de las clasificaciones ENSO segmentado por época. El eje y se ha ajustado al rango de valores de precipitación de las épocas lluviosa y seca, respectivamente, para poder apreciar mejor las diferencias entre fases ENSO.

Otra variable analizada fue la temperatura máxima promedio de las estaciones de interés. La Figura 6 muestra la evolución de la anomalía normalizada de temperatura promedio anual desde 1996 hasta 2025, con base en el periodo de referencia 1981–2010. Se observa una tendencia marcada ascendente, con pendiente positiva y con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.6963, lo cual indica un crecimiento sostenido de la temperatura en las ubicaciones de interés, especialmente desde 2010. Estos resultados evidencian una tendencia de calentamiento que concuerda con los informes de cambio climático global, lo cual podría afectar la disponibilidad de recursos hídricos y la eficiencia de las hidroeléctricas en el futuro.

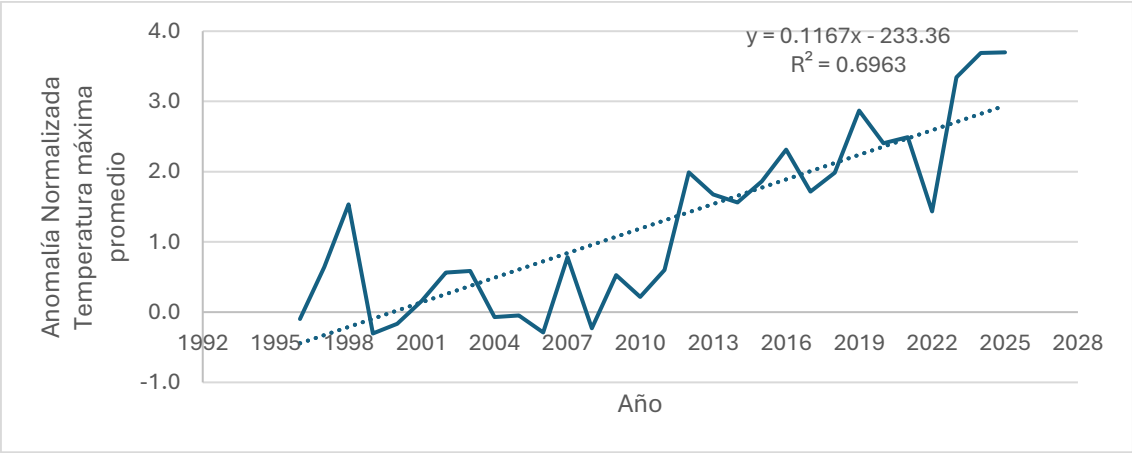


Figura 6: Anomalía normalizada de temperatura máxima promedio (periodo de referencia 1981-2010) elaboración propia (datos históricos climáticos de INSIVUMENH, 2025)

5.2 Análisis de Generación de energía y eventos ENSO

El segundo objetivo específico del trabajo fue evaluar el comportamiento de la generación y precios de energía en eventos climáticos extremos (fenómenos ENSO). Para esto se evaluó el comportamiento de diferentes variables con el fin de determinar el efecto que tiene los fenómenos ENSO en el mercado eléctrico. Para ello, se obtuvo la serie temporal de generación hidroeléctrica mensual desde 2013 hasta 2024 y de igual forma que para la serie temporal de precipitación, se incluyó la serie temporal de ONI, marcando los eventos de interés ENSO. Como resultado se obtuvo la Figura 7.

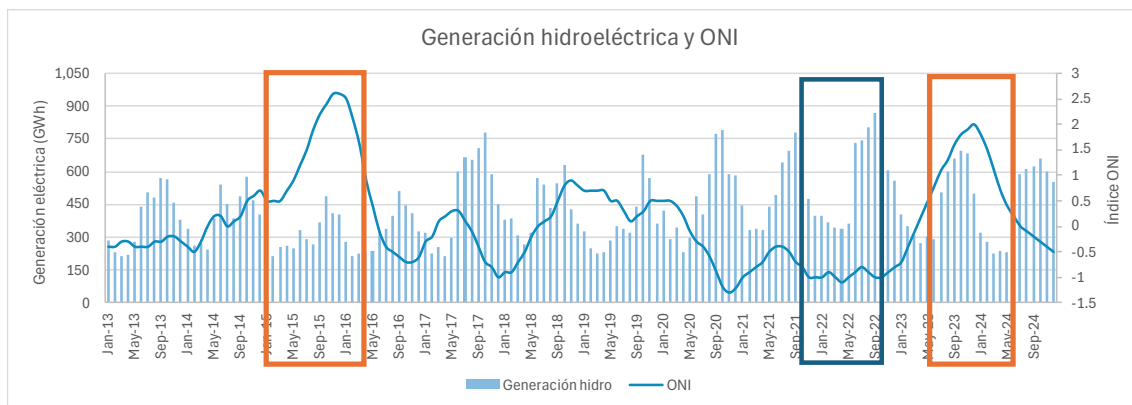


Figura 7: Serie temporal de generación hidroeléctrica y serie temporal ONI (datos de generación por AMM y el índice por NOAA, 2025) Los recuadros naranjas destacan periodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.

En la Figura 7 se aprecia que durante el evento El Niño muy fuerte (2015/2016), el ONI alcanzó valores superiores a $+1.5^{\circ}\text{C}$ por varios meses consecutivos. En ese mismo periodo, la generación hidroeléctrica experimentó una caída progresiva durante la época lluviosa, en contraste, durante La Niña moderada (2021/2022), caracterizada por valores negativos del ONI entre -1.0°C y -1.3°C , la generación hidroeléctrica aumentó especialmente durante la época lluviosa, alcanzando máximos cercanos a los 900 GWh mensuales. Esta recuperación coincide con los aumentos en precipitación observados en la Figura 4 y respalda la hipótesis de que los eventos fríos del ENSO La Niña tienen un efecto positivo en la producción hidroeléctrica.

Por último, el evento El Niño fuerte más reciente (2023/2024) muestra un comportamiento parcialmente diferente. Aunque el ONI volvió a superar el umbral de $+1.5^{\circ}\text{C}$, la reducción de la generación hidroeléctrica durante la época lluviosa fue menos pronunciada en comparación con el evento de 2015/2016. Posteriormente, se observó una disminución en la generación durante la época seca, aunque no de manera tan marcada. Esta diferencia podría atribuirse a varios factores: la intensidad de los eventos es diferente (siendo más intenso el de 2015/2016).

Otro factor que pudo afectar es que la condición climática previa es diferente, mientras que el evento El Niño 2015/2016 fue precedido por años neutrales, El Niño 2023/2024 ocurrió inmediatamente después de dos años consecutivos de La Niña. Este análisis es relevante desde el punto de vista técnico y operativo, ya que dentro del campo de generación se cuenta con hidroeléctricas de embalse, que les permite almacenar agua durante el invierno para generar energía durante los meses secos. Por tanto, la acumulación previa de recurso hídrico afecta la generación durante el año en curso.

De igual forma que el análisis estadístico de la variable de precipitación, se realizó el análisis de correlación entre las variables de generación hidroeléctrica y el valor ONI, con el fin de evaluar estadísticamente la influencia del fenómeno ENSO sobre el comportamiento de la generación. En primer lugar, se aplicó la correlación de Pearson sobre la serie temporal mensual completa, utilizando todos los datos disponibles de generación y ONI mes a mes. Este análisis mostró una correlación negativa débil pero estadísticamente significativa, lo cual sugiere que, en general, los valores elevados de ONI (condiciones El Niño) tienden a coincidir con reducciones mensuales en la generación hidroeléctrica.

Posteriormente, se procedió a una segmentación por época climática (seca y lluviosa), utilizando datos agregados por año estacional. Para ello, se calculó la generación hidroeléctrica acumulada por época y el valor promedio del ONI correspondiente a cada una de las épocas. Observando el

Tabla 6, se aprecia que durante la época lluviosa existe una correlación negativa moderada a fuerte y estadísticamente significativa entre el ONI promedio y la generación hidroeléctrica acumulada, confirmando que eventos El Niño tienden a reducir de forma más marcada la generación en esta época. En contraste, durante la época seca, la correlación fue débil y no significativa, lo que podría explicarse por la menor dependencia del régimen hidrológico en ese período, así como por la presencia de otros factores climáticos locales. Estos resultados son congruentes con los obtenidos para la variable de precipitación.

Tabla 6: Análisis de correlación de Pearson entre el índice ONI y la generación hidroeléctrica, aplicado a la serie completa y segmentado por época climática

Época	Coefficiente de Pearson (r)	Valor p	Interpretación
Serie completa	-0.27	0.001	Correlación débil, significativa
Lluviosa	-0.64	0.02	Correlación negativa moderada a fuerte, significativa
Seca	-0.214	0.07	Correlación débil, no significativa

Además, se aplicó una prueba de análisis de varianza (ANOVA de un factor) con el fin de comparar la generación hidroeléctrica acumulada media entre distintas fases del fenómeno ENSO, según la clasificación de la NOAA. Esta prueba fue aplicada de manera independiente para cada época climática (lluviosa y seca), siguiendo la misma metodología utilizada en el análisis para la variable de precipitación. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Análisis ANOVA de generación acumulada media entre diferentes clasificaciones ENSO

Época	Grupos estudiados	Factor (ANOVA)	F	Valor p	Diferencia estadística significativa
Lluviosa	Neutro, La Niña moderada, El Niño (incluyendo moderado y fuerte)	4.22		0.051	Casi significativa, valor p cercano al límite
Seca	Neutro, La Niña moderada, El Niño moderado y El Niño fuerte	0.29		0.8336	No

Los resultados en la Tabla 7 indican que la prueba ANOVA de un factor para la época lluviosa mostró una diferencia entre grupos casi significativa ($p=0.05$). Esta diferencia, aunque marginal, sugiere que la generación hidroeléctrica podría estar influenciada por el tipo de evento ENSO. Esta tendencia es consistente con los resultados visualizados en los diagramas de caja y bigotes de la Figura 8, donde se aprecia que los valores asociados a eventos La Niña tienden a ser más altos en comparación con los años neutros o los eventos El Niño. Para efectos del análisis, las categorías El Niño moderado y El Niño fuerte fueron agrupadas en una sola clasificación (“El Niño”), debido al número reducido de observaciones. Aunque se observa una diferencia en los valores promedio entre categorías, la amplitud de la distribución en los años Neutros, junto con la superposición entre grupos, dificulta la capacidad estadística para afirmar una diferencia significativa con mayor certeza.

En contraste para la época seca, no reveló diferencia estadísticamente significativa lo cual indica que durante este período no se presentan variaciones relevantes en la generación hidroeléctrica

atribuibles a las fases del ENSO. Asimismo, como se observa en la Figura 8, los diagramas de caja correspondientes a la época seca muestran una distribución más homogénea entre categorías, mostrando sobreposición entre ellas. Esto puede deberse a que se puede contar con una menor dependencia de las lluvias estacionales durante la época seca, especialmente para plantas con capacidad de regulación (embalses), la posible influencia de otras fuentes de generación eléctrica que contribuyen al sistema interconectado como la generación con biomasa (época de zafra) y por la presencia de otros factores de mercado u operativos como el despacho económico.

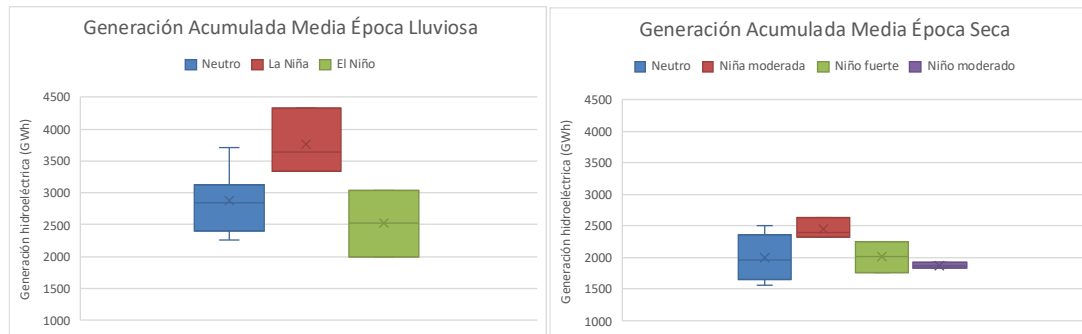


Figura 8: Diagramas de caja y bigotes de generación hidroeléctrica media acumulada de las clasificaciones ENSO segmentado por época.

Adicionalmente, se graficó el comportamiento anual de la generación hidroeléctrica mensual para ocho años seleccionados, tal como se muestra en la Figura 9. En ella se observa que, durante la época seca (noviembre a abril), el comportamiento de la generación es relativamente similar entre los distintos años, con variaciones menores. No obstante, a partir del mes de mayo (inicio de la época lluviosa), las diferencias entre años se vuelven mucho más marcadas, congruente con los resultados anteriores. En este contexto, destacan los años 2022 y 2021 como los de mayor generación durante los meses lluviosos. Ambos corresponden a eventos La Niña moderada, lo que es coherente con el aumento de precipitaciones asociado a esta fase ENSO. Además, el hecho de que 2022 fuera precedido por otro año La Niña (2021) podría haber permitido una mayor acumulación de agua en embalses, explicando así su nivel elevado de generación.

Por otro lado, los años con menor generación fueron 2015 y 2016, ambos clasificados como El Niño fuerte y El Niño moderado, respectivamente. Es especialmente relevante observar que, a pesar de que en 2015 y 2016 ya existía una mayor capacidad instalada hidroeléctrica (consultar Figura 12), la generación fue inferior a la observada en 2013, un año clasificado como Neutro, evidenciando así el impacto negativo que el fenómeno El Niño puede tener sobre la disponibilidad hídrica y, en consecuencia, sobre la generación. En cuanto a los años 2023 y 2024, ambos clasificados como El Niño moderado o fuerte, se observa que sus niveles de generación se sitúan en un rango intermedio, ligeramente por encima de los años neutros 2013 y 2018, pero muy por debajo de los años La Niña.

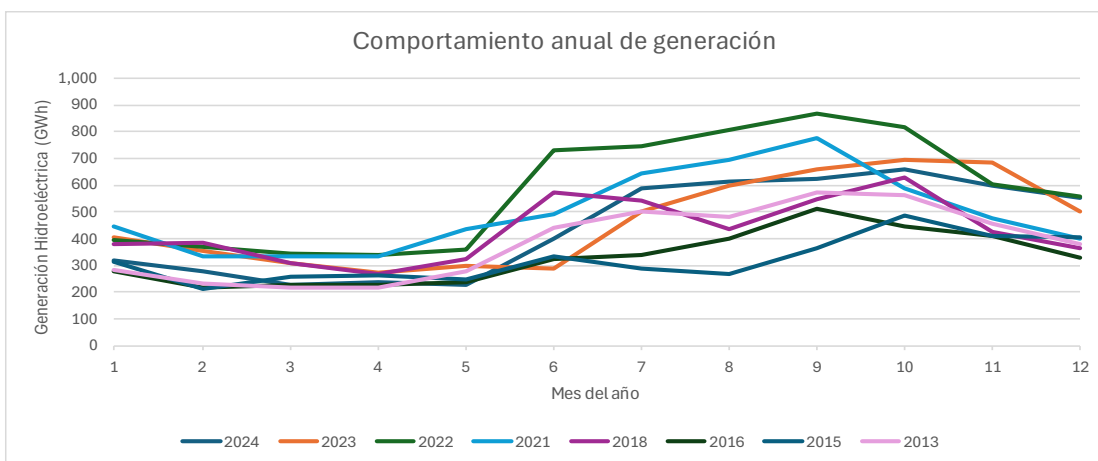


Figura 9: Comportamiento anual de generación hidroeléctrica en años de interés (datos de AMM, 2025)

Como hemos observado, la generación hidroeléctrica se ve influenciada por el comportamiento del fenómeno ENSO especialmente durante la época lluviosa. Dado que el sistema eléctrico nacional debe garantizar el suministro energético continuo, una reducción en la generación hidroeléctrica debe ser compensada por otras fuentes de generación. Con el fin de comprobar estadísticamente que esta falta de generación se reemplaza con generación térmica a partir de fuentes fósiles (carbón, bunker y coque de petróleo) se elaboró la Figura 10, la cual muestra la evolución mensual de la generación eléctrica desagregada por fuente energética, superpuesta con ONI como indicador del comportamiento ENSO.

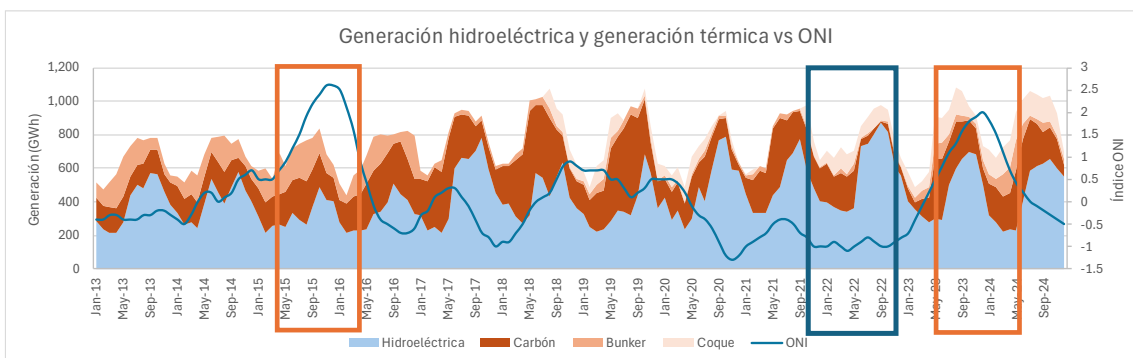


Figura 10: Evolución de generación hidroeléctrica y térmica representativa con serie temporal de ONI (datos de generación por AMM y el índice por NOAA, 2025) Los recuadros naranjas destacan periodos de El Niño y los recuadros azules, de La Niña.

A partir de la Figura 10 se observa que durante los eventos El Niño, se produce una reducción significativa en la generación hidroeléctrica (particularmente en la época lluviosa) acompañada por un aumento notorio en la participación de la generación térmica, especialmente del búnker y el carbón. Este patrón es particularmente evidente durante el evento El Niño fuerte 2015–2016, donde la disminución de la generación hidroeléctrica coincide con un aumento sostenido de la generación térmica. Un comportamiento similar se identifica en el evento 2023/2024. Por otro lado, durante los años La Niña (2021/2022), se observa un repunte en la generación hidroeléctrica, coincidiendo con un descenso en el uso de fuentes fósiles. Con el fin de validar estadísticamente esta relación, se realizó un análisis de correlación de Pearson de la generación mensual de energía desde 2013 a la actualidad por tipo de combustible. Los resultados se presentan en la Figura 11.

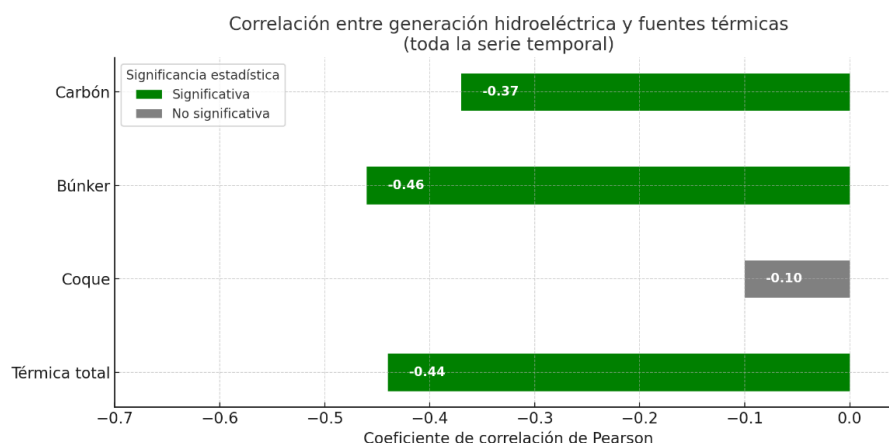


Figura 11: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) tomando toda la serie temporal

En la Figura 11 se observa una correlación negativa moderada y significativa entre la generación hidroeléctrica y la generación total térmica ($r = -0.44$, $p < 0.001$), indicando que a medida que disminuye la generación hidroeléctrica, aumenta la participación de fuentes térmicas. Esta relación es especialmente fuerte en el caso del búnker, que presenta una correlación negativa moderada significativa ($r = -0.46$, $p < 0.001$), lo que sugiere su uso como remplazo operativo ante reducciones en la generación hidroeléctrica. El carbón también muestra una correlación negativa moderada, aunque ligeramente inferior ($r = -0.37$, $p < 0.001$), lo cual refuerza su contribución sustitutiva en condiciones de baja disponibilidad hídrica. Por otro lado, el coque de petróleo no presenta una correlación significativa ($r = -0.10$, $p = 0.35$), lo cual puede atribuirse a que su incorporación en la matriz energética es más reciente (a partir de 2018), limitando así la robustez estadística de esta serie.

Adicionalmente, se realizó el análisis por época debido a la estacionalidad de la generación hidroeléctrica. Al segmentar por época seca, se observó una intensificación de la correlación (Figura 12). La correlación negativa entre hidroeléctrica y generación por carbón es fuerte y significativa ($r = -0.51$, $p < 0.001$), mientras que, para el búnker, la relación se mantiene moderada ($r = -0.44$, $p < 0.001$). Por el contrario, la generación por coque de petróleo no presenta correlaciones significativas en ninguna de las divisiones analizadas, lo que podría explicarse por su participación relativamente menor. Sin embargo, de igual forma la generación total presenta una correlación negativa fuerte estadísticamente significativa ($r = -0.65$, $p < 0.001$). Esto refuerza la hipótesis de que las fuentes térmicas, son despachadas en mayor proporción durante los meses con menor disponibilidad hídrica.

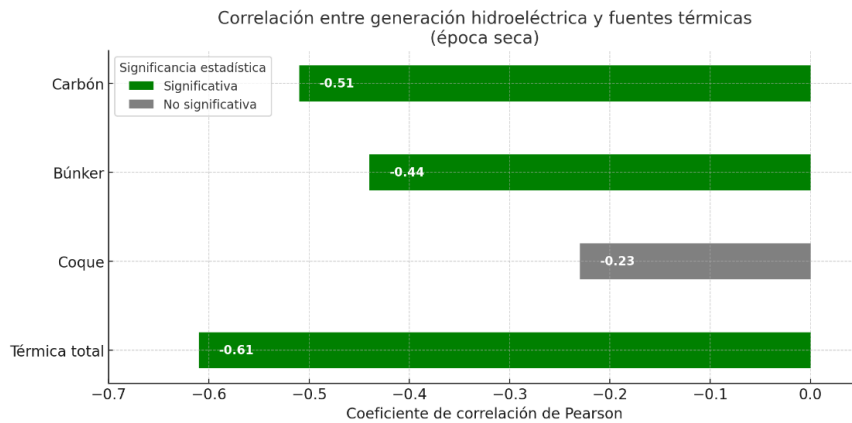


Figura 12: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) época seca

En cuanto a la época lluviosa los resultados indican con claridad una relación inversa fuerte y estadísticamente significativa entre la generación hidroeléctrica y la generación térmica (en particular con carbón y búnker) tal y como se muestra en la Figura 13. La generación térmica total muestra la correlación negativa más fuerte con la generación hidroeléctrica ($r = -0.85$, $p < 0.001$), evidenciando un patrón de compensación operativa: cuando disminuye la generación hidroeléctrica, aumenta significativamente la generación térmica. En particular, se observa una correlación negativa fuerte con el carbón ($r = -0.78$) y con el búnker ($r = -0.67$), ambas con valores p altamente significativos.

Estos resultados sugieren que el carbón y el búnker han sido utilizados como tecnologías de respaldo ante la disminución de la generación hidroeléctrica durante la época lluviosa a lo largo de los años. La razón por la cual los coeficientes de correlación en la época lluviosa resultan más elevados que en la época seca podría estar asociada a la participación de otras fuentes térmicas, particularmente la biomasa. Durante la época seca, existe una mayor contribución estacional de la generación por biomasa, correspondiente a la temporada de zafra mediante cogeneración con bagazo de caña de azúcar (MEM, 2024), lo cual podría diluir o amortiguar la relación directa entre la generación hidroeléctrica y el uso de fuentes fósiles. En contraste, en la época lluviosa, al no contar con esta fuente alternativa, el sistema eléctrico depende en mayor medida de tecnologías fósiles como el búnker y el carbón para cubrir la demanda, intensificando así la correlación observada.

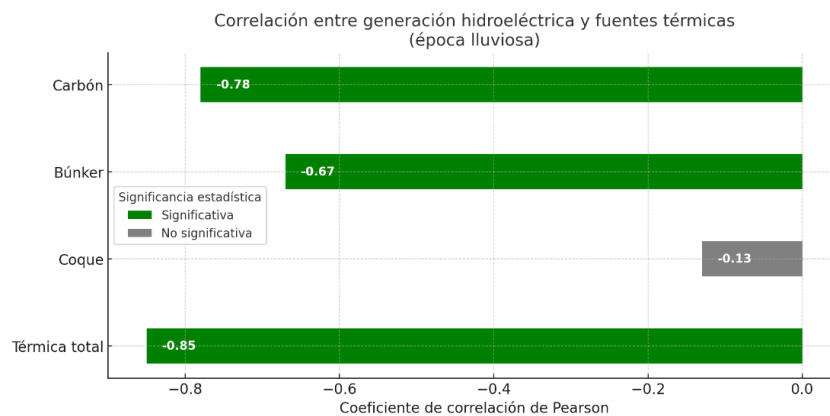


Figura 13: Análisis de correlación de Pearson entre generación hidroeléctrica y generación térmica (carbón, bunker y coque) época lluviosa

Para complementar el análisis de la generación eléctrica y entender las variaciones observadas a lo largo de los años, se presenta en la Figura 14 la evolución de la generación anual por tipo de combustible en el período 2013–2024. Los análisis previos mostraron que las fuentes fósiles, en particular el carbón y el búnker, han operado como tecnologías de respaldo ante la disminución de la generación hidroeléctrica, especialmente durante eventos climáticos extremos como El Niño. Esta figura permite visualizar cómo, en años con menor generación hidroeléctrica, como 2015, 2016 o 2023, se incrementa la participación de estas fuentes térmicas, lo que refuerza su papel como mecanismo de remplazo dentro del sistema eléctrico.

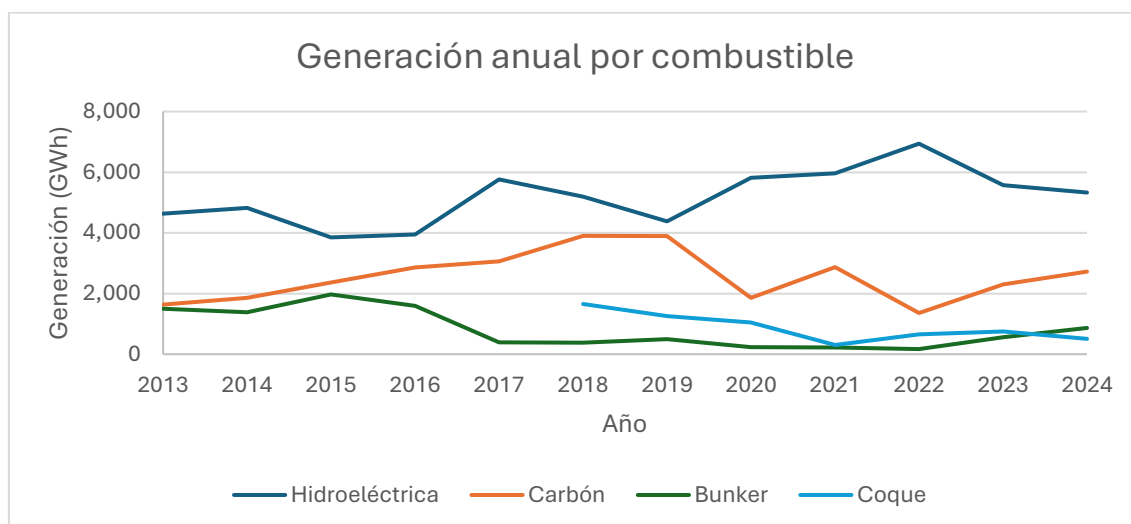


Figura 14: Evolución de generación eléctrica por tipo de combustible desde 2013 a 2024 (datos de AMM, 2025) la incorporación del coque de petróleo fue en 2018 por lo que la serie comienza en dicho año.

No obstante, el comportamiento de la generación térmica también está condicionado por factores económicos y de mercado, como los precios internacionales de los combustibles, los contratos vigentes en el mercado eléctrico, y los costos de despacho. Por tanto, el aumento o disminución de generación térmica no siempre responde exclusivamente a una lógica de sustitución hidráulica, sino también a decisiones operativas que buscan minimizar costos dentro del sistema y poder suplir la demanda existente del país. Esto se puede observar en el aumento de generación térmica en 2018 y 2019 que podría estar vinculado a condiciones más competitivas en los precios de este combustible (MEM, 2024). Cabe mencionar que la serie de la variable de generación de Coque de petróleo comienza en 2018 debido a que en este año se incorpora como combustible utilizado en la generación en la matriz energética del país, remplazando generación por carbón (AMM, s.f.).

Es importante destacar que esta evolución de la generación no siempre está directamente relacionada con la capacidad instalada de cada fuente. Para comprender esta relación, se presenta la Figura 15, que muestra la evolución de la potencia efectiva anual por tipo de recurso. A pesar del incremento progresivo en la capacidad hidráulica instalada a lo largo del período, la generación efectiva en algunos años fue inferior a años anteriores. Por ejemplo, en 2016, a pesar de un aumento de potencia instalada, la generación hidroeléctrica fue una de las más bajas debido al evento El Niño fuerte. Esto evidencia que disponer de mayor capacidad no necesariamente se traduce en un mayor nivel de generación, ya que esta depende también de la disponibilidad del recurso (como el agua en el caso hidroeléctrico) y de factores operativos o económicos.

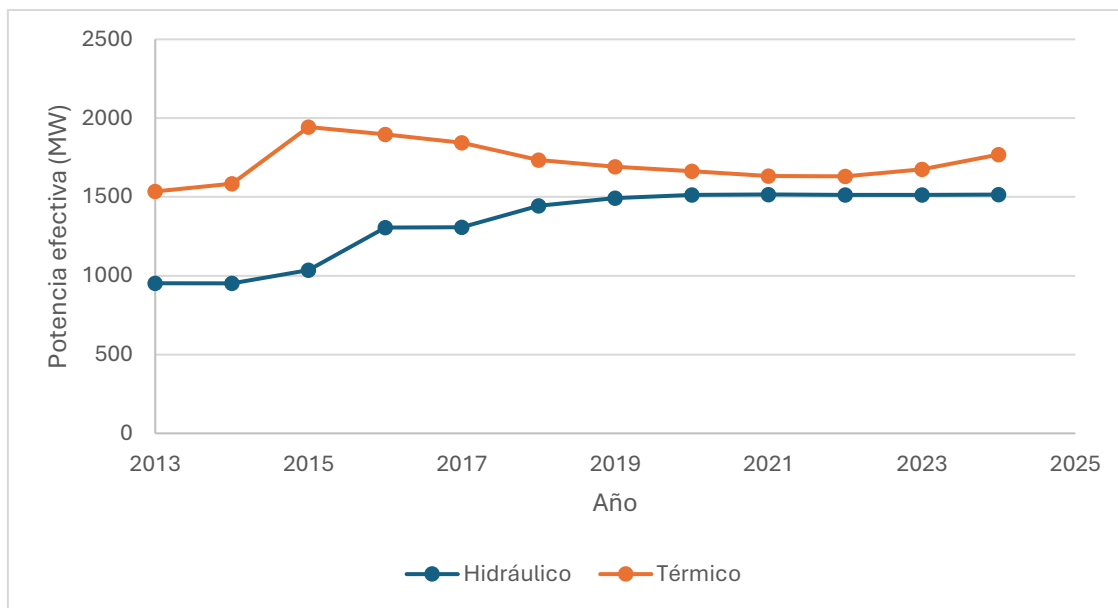


Figura 15: Evolución de potencia efectiva anual hidráulica y térmica (elaboración propia con datos AMM, 2025)

A pesar del creciente interés global por diversificar la matriz energética mediante tecnologías renovables no convencionales, en el caso de Guatemala la participación de fuentes como la geotermia, la energía solar fotovoltaica y la eólica continúa siendo limitada. Tal como se observa en la Figura 16, la potencia efectiva de estas tecnologías ha mostrado un crecimiento muy gradual, con la incorporación de la energía solar y eólica a partir de 2015, impulsadas por el Plan de Expansión del Sistema de Generación (PEG-1). Este plan, elaborado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), tiene como objetivo identificar las necesidades futuras de generación eléctrica en el país y promover una matriz más diversificada, sostenible y confiable, con un horizonte de planificación de 15 años por medio de licitaciones para entes públicos y privados (CNEE, 2023).

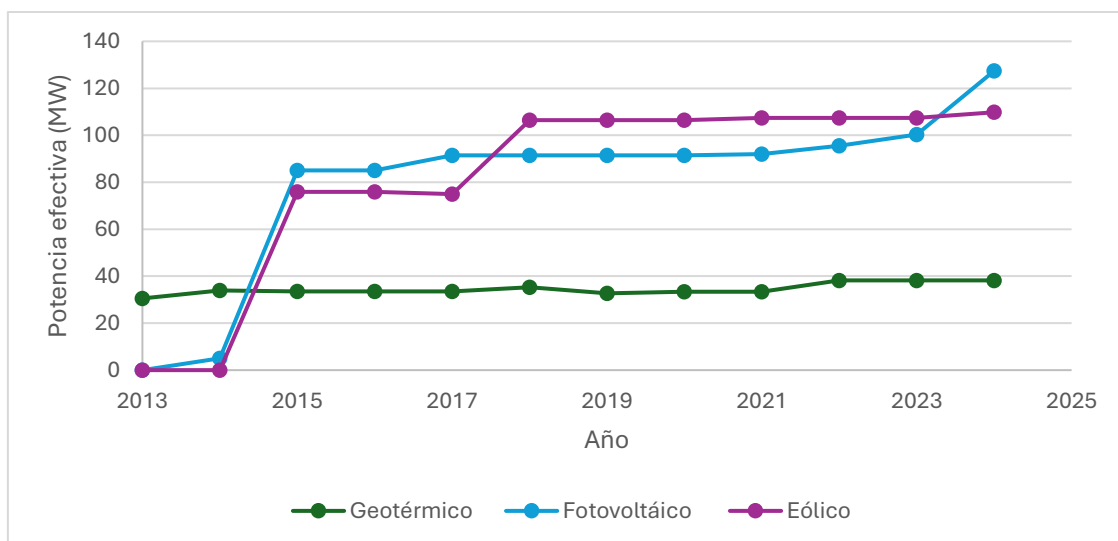


Figura 16: Evolución de potencia efectiva anual por tipo de tecnología renovable no convencional (elaboración propia con datos AMM, 2025)

Aunque el PEG ha promovido la incorporación de tecnologías limpias al sistema eléctrico nacional, la participación de las fuentes renovables no convencionales sigue siendo limitada

dentro del mix energético. En 2024, la generación eléctrica proveniente de fuentes geotérmicas representó únicamente el 2.1%, la energía eólica el 2.2% y la solar fotovoltaica el 1.9%. En contraste, la generación hidroeléctrica, considerada una fuente renovable convencional, alcanzó un 40.6%, mientras que la generación térmica a partir de biomasa representó un 12.2%. El resto de la generación térmica, proveniente de combustibles fósiles, concentró el 40.9% del total nacional de generación (sin tomar en cuenta la exportación e importación de energía consultar Tabla 9 en Anexos 8.2). Estos datos evidencian que, a pesar de los esfuerzos estratégicos planteados en el PEG, las fuentes renovables no convencionales aún tienen un peso marginal en la matriz energética de Guatemala (Consultar Figura 22 en Anexos 8.2). Este aspecto será abordado con mayor profundidad más adelante.

5.3 Análisis de demanda y Precio de Oportunidad de Energía (POE)

A lo largo de este trabajo se ha evidenciado cómo la variabilidad climática, particularmente asociada a los fenómenos ENSO, tiene un impacto significativo en la generación hidroeléctrica del país, especialmente durante la época lluviosa. Asimismo, se ha comprobado que, ante la disminución de generación hídrica, el sistema ha recurrido a tecnologías térmicas (principalmente carbón y búnker) como fuentes de reemplazo. Sin embargo, la dinámica del sistema eléctrico guatemalteco no puede comprenderse únicamente desde la perspectiva de la oferta. La evolución de la demanda eléctrica es otro componente clave.

En los últimos años, Guatemala ha experimentado un crecimiento sostenido y acelerado de la demanda eléctrica, impulsado por factores estructurales como el aumento poblacional, el desarrollo de sectores productivos y la expansión de la cobertura de electrificación. Tal como se ilustra en la Figura 17, la demanda presenta una tendencia general al alza desde el año 2000, con un crecimiento más marcado a partir de 2021, luego de una caída significativa en 2020 como consecuencia de la desaceleración económica provocada por la pandemia de COVID-19. De igual forma se muestra el comportamiento del aumento porcentual de la demanda año a año donde observamos que en los últimos años se encuentra en valores mayores a 3% llegando hasta valores de 8% de crecimiento anual.

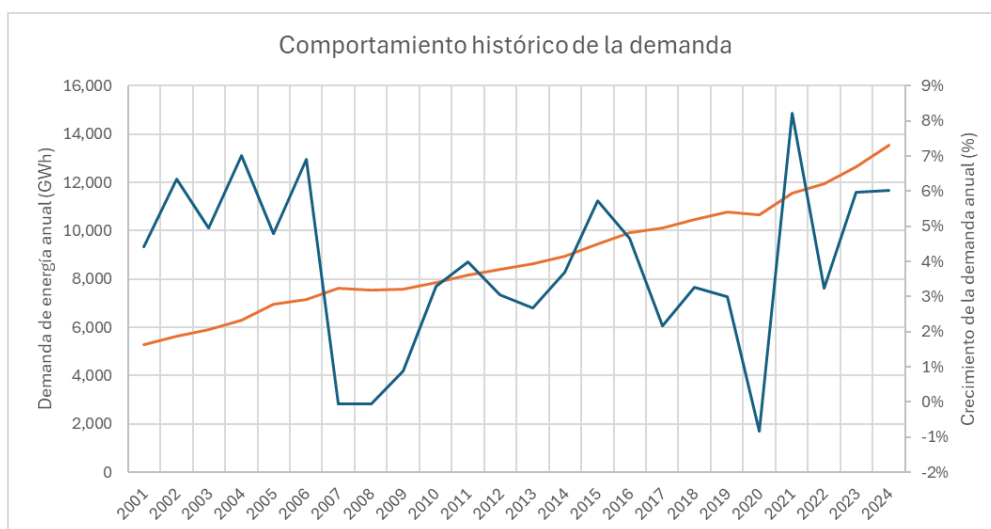


Figura 17: Comportamiento histórico de demanda y crecimiento de la demanda anual desde 2000 a la actualidad (datos de AMM, 2025)

Este crecimiento acelerado plantea desafíos importantes para el sector, ya que la expansión de la capacidad instalada y la diversificación del mix energético no siempre se ha dado al mismo ritmo, lo cual puede generar tensiones entre oferta y demanda en ciertos periodos del año, particularmente en escenarios climáticos adversos o de estrés en el mercado eléctrico, lo cual tiene implicaciones directas en un sistema donde la generación depende en buena medida de recursos hídricos y de tecnologías térmicas sujetas a los precios internacionales de combustibles fósiles. Cualquier desequilibrio entre oferta y demanda puede traducirse en variaciones significativas del precio de oportunidad (POE) o precio spot de energía.

En este contexto, resulta fundamental analizar la evolución histórica del POE, tanto en términos generales como desagregados por bandas horarias para comprender con mayor profundidad las variables que explican sus fluctuaciones, y su posible relación con eventos climáticos, comportamiento de la demanda, mix energético del país y precios internacionales de los combustibles. Esta sección aborda precisamente esa evolución y sus principales determinantes.

El POE, o también llamado precio spot en el mercado mayorista de Guatemala, presenta un comportamiento históricamente volátil, influenciado por una combinación de factores climáticos, operativos, económicos y geopolíticos. En la Figura 18 se presenta la evolución mensual del POE, desagregado en sus tres componentes: precio promedio, banda de valle y banda de punta, junto con el índice ONI como representación de las fases del fenómeno ENSO. El precio en banda de punta corresponde a las horas del día con mayor demanda eléctrica, generalmente en la mañana y en la tarde-noche, cuando el consumo residencial, comercial e industrial es más alto. Por otro lado, el precio en banda de valle se refiere a las horas de menor demanda, típicamente en la madrugada. Estas franjas horarias reflejan las variaciones del costo marginal de generación a lo largo del día y permiten observar con mayor detalle los momentos de mayor presión sobre el sistema eléctrico.

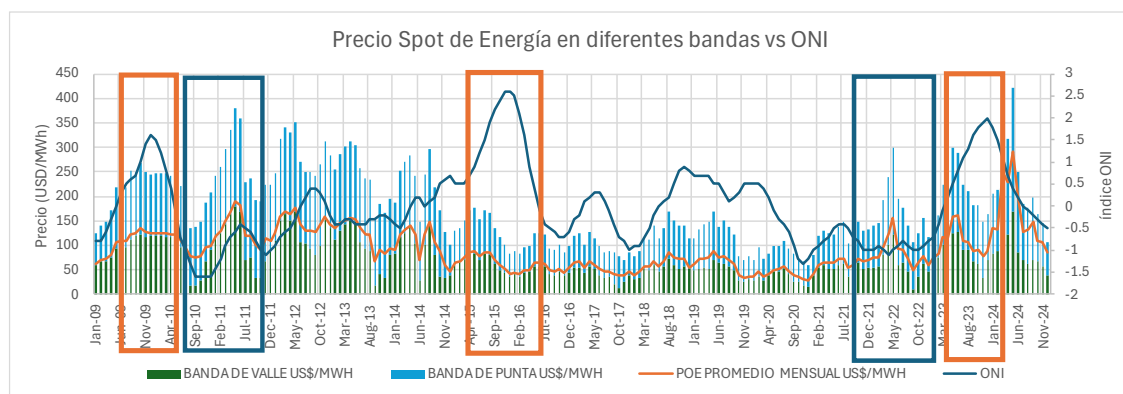


Figura 18: Evolución de Precio de Oportunidad de Energía o Spot en diferentes bandas y valor ONI (datos precio AMM y datos ONI de NOAA, 2025).

A lo largo del período 2009–2024, se identifican repuntes importantes en los precios, algunos de los cuales coinciden con eventos históricos como el Niño fuerte de 2015–2016 o las disrupciones de mercado postpandemia en 2022 y la crisis energética internacional derivada del conflicto Rusia–Ucrania. Entre 2011 y 2012, se registraron picos significativos de POE asociados al alto costo internacional de los combustibles fósiles influenciado por la inestabilidad geopolítica en Oriente Medio y el norte de África durante la Primavera Árabe (Baker Institute, 2011).

Los eventos climáticos tipo El Niño han tenido un impacto directo en el aumento de precios, como se evidenció claramente durante los episodios de 2015/2016 y 2023/2024. Siendo mucho más

marcado en 2023/24 debido a que no se contaba con el amortiguamiento del aumento de capacidad efectiva como se tuvo en 2015/2016 (consulta Figura 15). En contraste, durante el episodio La Niña 2021/2022, vemos una disminución marcada de precios, hasta febrero de 2022, coincidente con el aumento de precios de los combustibles por el conflicto entre Rusia y Ucrania (Zhang, 2024).

Este comportamiento sugiere la relación inversa entre la disponibilidad hidroeléctrica y los niveles de POE y una relación positiva con la generación térmica. Demostrando la vulnerabilidad del sistema ante eventos climáticos extremos, especialmente cuando el mix energético aún depende en gran medida del recurso hídrico. Asimismo, se evidencia que el mercado enfrenta riesgos significativos tanto por la variabilidad climática como por su exposición a las dinámicas internacionales del precio de los combustibles fósiles, lo que resalta la necesidad de fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico y avanzar hacia una diversificación más robusta y sostenible del mix energético nacional.

Con el objetivo de comprender con mayor profundidad los factores que inciden en el comportamiento del precio spot de la energía eléctrica en Guatemala, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las tres bandas de precio (promedio mensual, banda de valle y banda de punta) y un conjunto de variables relevantes del mercado eléctrico. Estas variables incluyeron: la generación eléctrica por tipo de fuente (hidroeléctrica, carbón y búnker), la demanda eléctrica mensual, el índice ONI (como indicador de eventos climáticos ENSO), así como los precios internacionales de los combustibles fósiles (carbón y búnker).

Cabe destacar que, para el precio del carbón, se tomó como referencia el valor del carbón colombiano, dado que dicho país representa el 94 % de las importaciones de carbón térmico hacia Guatemala (IndexBox, 2023). En cuanto al precio del búnker, se utilizaron los datos oficiales proporcionados por la U.S. Energy Information Administration (EIA) hasta el año 2022 (EIA, 2022). Posteriormente, se aplicó una aproximación debido a la suspensión de la publicación de esta información por parte de dicha entidad. Con estos datos se realizó el análisis los resultados del análisis de correlación multivariable para el Precio de Oportunidad de Energía (POE) promedio mensual (Figura 19).

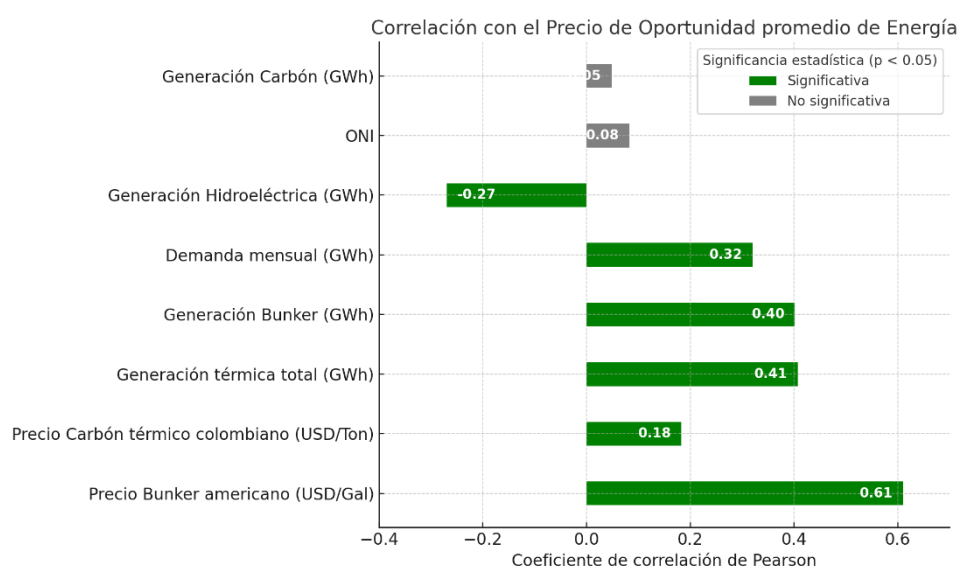


Figura 19: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad promedio de Energía

Entre las variables que presentan una relación positiva y estadísticamente significativa con el POE, destaca en primer lugar el precio internacional del búnker, con una correlación moderada ($r = 0.61$, $p < 0.01$). Este resultado evidencia que el comportamiento del mercado global de combustibles fósiles, especialmente del búnker, influye directamente en el costo marginal de generación eléctrica en el país, debido a su uso extendido como respaldo térmico. En segundo lugar, se observa una correlación negativa significativa con la generación hidroeléctrica ($r = -0.27$, $p < 0.001$), lo cual indica que una mayor disponibilidad del recurso hídrico contribuye a reducir el precio promedio de la energía. Este comportamiento se alinea con los hallazgos anteriores de este trabajo, que demostraron cómo los eventos ENSO tipo El Niño reducen la generación hidroeléctrica, aumentando la necesidad de despacho térmico más costoso y en eventos la niña sucede el caso contrario.

Por otro lado, la generación térmica total, así como la generación específica con carbón y búnker, presentan correlaciones positivas con el POE, aunque de distinta magnitud. En particular, la generación con búnker presenta la mayor correlación entre las térmicas, lo que refuerza su papel como tecnología marginal en la cobertura de demanda. La generación con carbón también está positivamente relacionada, aunque con menor fuerza. También se identifica una correlación positiva significativa con la demanda mensual, lo cual sugiere que el crecimiento de la demanda ejerce presión sobre el sistema, aumentando el precio marginal dado a que se requiere mayor generación que termina siendo de mayor costo. Finalmente, el índice ONI, no muestra una correlación directa significativa con el POE promedio, esto puede deberse a que se tiene en juego muchas variables que tienen un mayor peso sobre el comportamiento del precio de la energía como lo es los precios de combustible.

En esta franja de menor demanda o banda valle como se observa en la Figura 20, los precios tienden a ser más estables y reflejan en mayor medida el despacho de tecnologías de base. Se mantiene la correlación negativa significativa con la generación hidroeléctrica ($r = -0.46$), lo cual sugiere que, en las horas de menor consumo, la disponibilidad hídrica es un factor determinante para mantener precios bajos. En esta banda, las correlaciones con combustibles fósiles tienden a ser más débiles, posiblemente porque estas tecnologías son menos utilizadas durante las horas de valle.

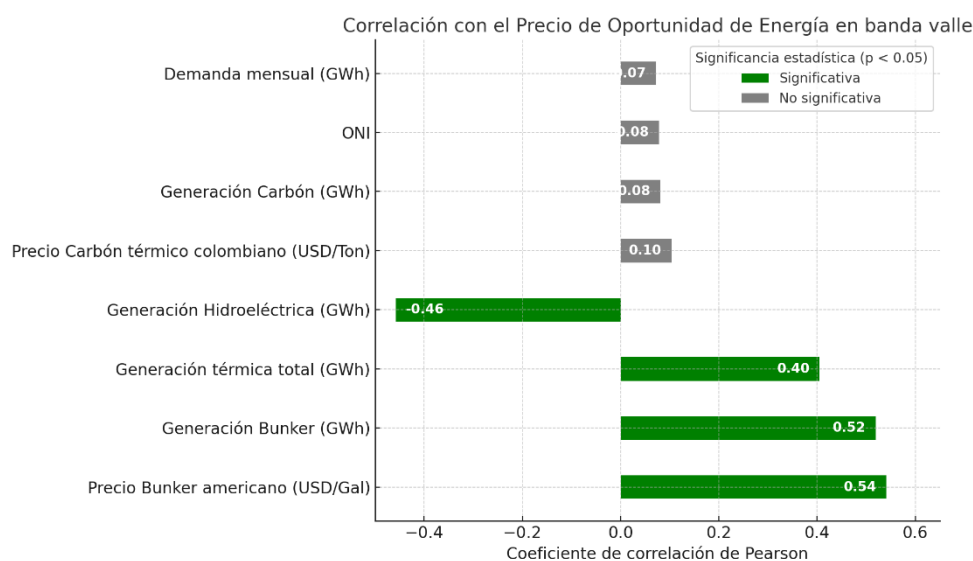


Figura 20: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad de Energía en banda valle

La correlación en la banda punta como muestra la Figura 21, es más fuerte con variables asociadas al respaldo térmico. En especial, destaca la fuerte correlación positiva con el precio internacional del búnker ($r = 0.74$), indicando que el costo de este combustible tiene un impacto directo en los precios durante los momentos de mayor demanda. La generación con búnker y térmica total también presenta correlaciones más elevadas que en otras bandas, lo que sugiere que durante las horas punta, el sistema depende más del respaldo fósil. Esta banda refleja de forma más clara la presión del mercado ante eventos de escasez o picos de demanda, reforzando la sensibilidad del POE a variables tanto climáticas y operacionales, como de mercado y de geopolítica.

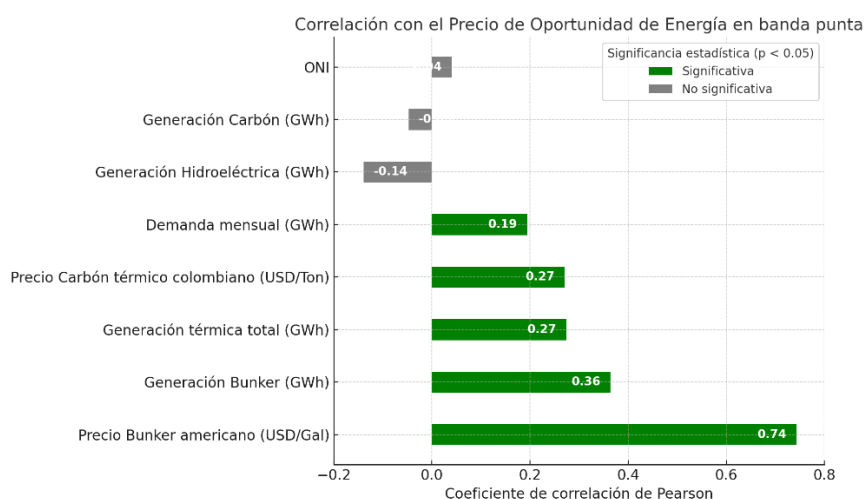


Figura 21: Correlación de Pearson Multivariable con el Precio de Oportunidad de Energía en banda valle

Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo evidencian con claridad que el sistema eléctrico guatemalteco es altamente vulnerable a factores externos como los eventos climáticos extremos (El Niño y La Niña), los precios internacionales de combustibles fósiles y la variabilidad en la disponibilidad hídrica. La fuerte dependencia del país hacia fuentes térmicas convencionales para suplir la disminución de generación hidroeléctrica, especialmente en época lluviosa o durante sequías prolongadas, genera fluctuaciones importantes en el precio de la energía (POE), lo que puede traducirse en impactos económicos tanto para el sector eléctrico como para los consumidores finales del mercado minorista y mayorista. Los resultados discutidos confirman que, si bien el fenómeno ENSO influye directamente en la disponibilidad de recurso hídrico, su efecto sobre los precios se manifiesta de forma indirecta, a través de la modificación del despacho de tecnologías en el sistema.

5.4 Diversificación de mix energético

La estrecha correlación entre el POE y variables como el precio internacional del búnker, la generación térmica total y la demanda energética nacional, evidencia la exposición del sistema eléctrico a factores económicos externos y a una matriz energética que aún depende considerablemente de tecnologías no renovables y volátiles. Este comportamiento refuerza la urgencia de avanzar hacia un modelo energético más resiliente, capaz de garantizar seguridad energética y estabilidad tarifaria en un contexto de creciente variabilidad climática agravada por el cambio climático y la incertidumbre geopolítica.

En este sentido, la diversificación del mix energético cobra un rol fundamental. Sustituir progresivamente la dependencia hacia el búnker y el carbón (dos combustibles fósiles altamente contaminantes cuya combustión genera emisiones significativas de dióxido de carbono, óxidos

de azufre y otros contaminantes atmosféricos) permitiría no solo reducir la exposición del mercado a las volatilidades externas, sino también disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y el potencial de calentamiento global (IRENA, 2020). Esto resulta clave para cumplir los compromisos internacionales de sostenibilidad y limitar los efectos del cambio climático.

Si bien Guatemala ha iniciado una transición hacia fuentes renovables no convencionales, su penetración en la matriz aún es marginal. Tecnologías como la geotermia, la solar fotovoltaica y la eólica cuentan con una baja capacidad efectiva instalada, como se muestra en la Figura 16. Guatemala, sin embargo, se encuentra en una posición privilegiada para lograr la diversificación energética. Según datos de AGER, el país ha aprovechado apenas el 12 % de su potencial renovable estimado. Por ejemplo, de un potencial solar superior a los 7,000 MW, solo se han desarrollado cerca de 100 MW (1.43 %), mientras que el recurso eólico, con un potencial de 700 MW, ha sido utilizado apenas en un 15 %. Asimismo, aún se cuenta con un alto potencial hidroeléctrico (5,000 MW), del cual se ha utilizado el 30 %. Este panorama presenta una oportunidad estratégica para ampliar la generación renovable, sobre todo mediante tecnologías que no dependan del recurso hídrico estacional, como la geotermia, el sol y el viento (AGER, 2024).

Por tanto, se hace urgente fortalecer la planificación energética de largo plazo, promoviendo marcos regulatorios que favorezcan la incorporación de renovables firmes y de generación distribuida, así como mecanismos que incentiven la inversión en almacenamiento energético y flexibilidad operativa. En este contexto, la reciente publicación del PEG-5 (Plan de Expansión del Sistema de Generación 2023–2037) representa una oportunidad clave para avanzar hacia esa diversificación (CNEE, 2023). Es imprescindible acompañar este despliegue tecnológico con el fortalecimiento institucional, la mejora de la red de transmisión, el desarrollo de normativas modernas y el fomento a las inversiones privadas y público-privadas (AGER, 2024). Solo así será posible avanzar hacia una matriz energética más robusta, resiliente y alineada con los compromisos internacionales de sostenibilidad y cambio climático.

6. Conclusiones

- El fenómeno ENSO impacta de forma significativa en el sistema eléctrico guatemalteco. Durante El Niño se reduce la precipitación en época lluviosa ($r = -0.55$; $p = 0.027$), lo que limita la disponibilidad hídrica; en contraste, durante La Niña se observa un aumento de lluvias. En la época seca no se identificaron relaciones significativas.
- El análisis ANOVA evidenció que existe una diferencia significativa en la precipitación acumulada durante la época lluviosa entre las fases del ENSO ($F = 6.10$, $p = 0.0135$), con mayores precipitaciones en periodos de La Niña y menores en años El Niño. En cambio, durante la época seca no se encontraron diferencias significativas ($F = 0.29$, $p = 0.8336$), lo que sugiere que en ese periodo predominan otros factores climáticos locales o estacionales.
- La temperatura máxima promedio anual presenta una tendencia creciente desde 1996 ($R^2 = 0.6963$), consistente con el cambio climático global. Este calentamiento puede comprometer la eficiencia hidroeléctrica y la disponibilidad hídrica en el mediano y largo plazo.
- La generación hidroeléctrica es altamente sensible a las variaciones climáticas: disminuye en años El Niño y aumenta en años La Niña. La evidencia muestra que la disponibilidad hídrica pesa más que la capacidad instalada en la determinación de la generación.
- La reducción de generación hidroeléctrica se compensa con un mayor uso de tecnologías fósiles, principalmente búnker y carbón. Esta sustitución se confirma en la época lluviosa con correlaciones negativas fuertes ($r = -0.85$; $p < 0.001$), lo que demuestra un patrón estructural de reemplazo térmico ante la escasez hídrica.
- En época seca, aunque la relación hidro-térmica es menos intensa, el patrón de respaldo fósil se mantiene. La biomasa de la zafra ayuda a amortiguar parcialmente la reducción hídrica.
- El Precio de Oportunidad de Energía (POE) responde directamente a la disponibilidad de recurso hídrico, mostrando una correlación negativa significativa con la generación hidroeléctrica ($r = -0.42$; $p < 0.001$).
- Adicionalmente, el POE promedio mostró una correlación positiva significativa con variables del mercado como el precio internacional del búnker ($r = +0.58$, $p < 0.001$) la generación térmica total ($r = +0.47$, $p < 0.001$) y la demanda nacional ($r = +0.37$, $p < 0.001$). Estos resultados indican que, además de los factores climáticos, el comportamiento de los precios de energía está fuertemente influenciado por el costo de combustibles fósiles y el crecimiento de la demanda.
- El análisis por bandas horarias reveló que el POE es altamente sensible a la fuente de generación predominante. En la banda valle, predominan tecnologías de bajo costo, con una fuerte correlación negativa con la generación hidroeléctrica ($r = -0.48$), mientras que en la banda punta, el sistema depende del respaldo térmico, mostrando una fuerte correlación con el precio del búnker ($r = +0.74$). Estos resultados confirman que el mercado es más vulnerable en horas de alta demanda y ante escasez hídrica, reforzando la necesidad de diversificación energética.

- El sistema eléctrico guatemalteco presenta una alta vulnerabilidad estructural frente a eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña, así como a la volatilidad de los precios internacionales de los combustibles fósiles influenciados por aspectos geopolíticos. Esta alta dependencia de la generación hidroeléctrica estacional y el uso de generación térmica como tecnología de respaldo (búnker y carbón) se ven reflejados en la fuerte sensibilidad del Precio de Oportunidad de Energía (POE) ante escenarios de sequía o incremento en los costos de generación, afectando tanto la estabilidad del mercado como la seguridad energética del país.

7. Referencias

- AGER. (2024). *Propuesta de AGER para una Política Energética Sustentable y Resiliente*. Obtenido de Asociación de Generadores con Energía Renovable: <https://ager.org.gt/wp-content/uploads/2024/10/actualizacion-y-propuesta-ager.pdf>
- AMM. (2025). *Administrador del Mercado Mayorista*. Obtenido de Mercado eléctrico de Guatemala: Oportunidades de inversión: https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=950
- AMM. (s.f.). *Resultados de la Operación*. Obtenido de Administrador del Mercado Mayorista: https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=145
- Baker Institute. (2011). *The Arab Awakening and the pending oil pinch*. Obtenido de Baker Institute for Public Policy: <https://www.bakerinstitute.org/research/the-arab-awakening-and-the-pending-oil-pinch>
- BID. (2025). *Guatemala aumentará la cobertura eléctrica en zonas rurales con apoyo del BID*. Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo: <https://www.iadb.org/es/noticias/guatemala-aumentara-la-cobertura-electrica-en-zonas-rurales-con-apoyo-del-bid>
- Castellanos, A. P.-E.-A. (2019). *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala*. Obtenido de Sistema Guatemalteco de Cambio Climático: <https://sgccc.org.gt/category/reporte-de-cambio-climatico-guatemala/>
- CNEE. (2023). *plan de Expansión del Sistema de Generación 2023–2037*. Obtenido de Comisión Nacional de Energía Eléctrica : <https://www.cnee.gob.gt>
- CNEE. (s.f.). *Monitoreo del Mercado Mayorista*. Obtenido de Comisión Nacional de Energía Eléctrica: https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=9336
- EIA. (2022). *U.S. Residual Fuel Oil* . Obtenido de U.S. Energy Information Administration: https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EMA_EPPRH_PTG_NUS_DPG&f=M
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics (5th ed.)*. Sage Publications.
- IEA. (2022). *Energy Resilience and Security*. Obtenido de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>
- IndexBox. (2023). *Coal Other than Lignite – leading import suppliers to Guatemala*. Obtenido de IndexBox Database: <https://www.indexbox.io/search/price-for-coal-other-than-lignite-guatemala>
- INE. (2024). *El INE presenta cifras de pobreza en Guatemala*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.gob.gt/2024/08/21/el-ine-presenta-cifras-de-pobreza-en-guatemala>
- INSIVUMEH. (2018). *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Obtenido de <https://funcagua.org.gt/2018-variabilidad-y-cambio-climatico-en-guatemala-insivumeh/>

- INSIVUMEH. (2025). *Biblioteca de Datos Climáticos*. Obtenido de <http://dl.insivumeh.gob.gt/index.html>
- INSIVUMEH. (s.f.). *Biblioteca de Datos Climáticos*. Obtenido de <http://dl.insivumeh.gob.gt/index.html?Set-Language=es>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- IRENA. (2020). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de Renewable Energy and Energy Security: <https://www.irena.org/>
- MARN. (2024). *Los desafíos del Cambio Climático para Guatemala: Informe Ambiental del Estado de Guatemala*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales: https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/informe-ambiental-del-estado-de-guatemala/
- MEM. (2014). *Ministerio de energía y Minas Guatemala*. Obtenido de Mapa de Centrales Hidroeléctricas mayores de 5 MW: <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Mapa-hidroenerg%C3%A9tico.pdf>
- MEM. (2024). *Informe de Monitoreo y Evaluación: Operación del Subsector Eléctrico Nacional 2023*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2024/03/Informe-de-Monitoreo-y-Evaluacion-de-la-Operacion-del-Subsector-Elctrico-Nacional-2023-Revista.pdf>
- MEM. (s.f.). *Informes estadísticos*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <https://mem.gob.gt/que-hacemos/hidrocarburos/publicaciones/informe-estadistico-semanal/>
- NOAA. (2023). *What are El Niño and La Niña?* Obtenido de National Ocean Service: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>
- NOAA. (2025). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de National Weather Service: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- NOAA Climate Prediction Center. (2023). *Cold & Warm Episodes by Season (ONI)*. Obtenido de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- WMO. (2021). Obtenido de State of the Global Climate 2021: https://library.wmo.int/viewer/56300/download?file=1290_Statement_2021_en.pdf&type=pdf&navigator=1
- Zhang, Q. H. (2024). The impact of Russia–Ukraine war on crude oil prices: an EMC framework. *Humanities & Social Sciences Communications*, 11, 8. Obtenido de Humanities & Social Sciences Communications: <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02526-9>

8. Anexos

8.1 Glosario

- **AMM** (Administrador del Mercado Mayorista): Operador independiente encargado de la administración del sistema eléctrico nacional y del mercado mayorista de electricidad en Guatemala (AMM, 2025).
- **Banda de valle / Banda de punta**: Segmentación horaria del precio spot: “valle” se refiere a horas de baja demanda y “punta” a las de mayor demanda (AMM, s.f.).
- **Cambio climático**: Alteración a largo plazo de los patrones de temperatura y clima causados por emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (IPCC, 2023).
- **Capacidad instalada**: Potencia total que puede generar un sistema eléctrico si opera al máximo. Mide el tamaño del parque de generación (MEM, 2024).
- **CNEE** (Comisión Nacional de Energía Eléctrica) Ente regulador del sector eléctrico que supervisa tarifas, licencias y la protección de los usuarios del servicio eléctrico (AMM, 2025).
- **Cogeneración**: producción simultánea de electricidad y calor a partir de un mismo proceso, frecuente en industrias como la azucarera (AGER, 2024).
- **Diversificación energética**: Estrategia para reducir riesgos al incorporar distintas tecnologías (renovables y no renovables) en la matriz energética (IRENA, 2020).
- **ENSO** (El Niño–Oscilación del Sur): Fenómeno climático que incluye las fases de El Niño (calentamiento) y La Niña (enfriamiento) en el Pacífico tropical, afectando patrones meteorológicos globales (NOAA, 2023).
- **Generación hidroeléctrica**: Energía obtenida del flujo de agua en ríos o embalses. Es la principal fuente renovable en Guatemala. (MEM, s.f.).
- **Generación térmica**: Producción eléctrica mediante combustión de carbón, búnker o derivados fósiles (MEM, s.f.).
- **MEM** (Ministerio de Energía y Minas): Institución gubernamental encargada de formular políticas públicas en el sector energético y minero (AMM, 2025).
- **ONI** (Oceanic Niño Index): Índice oficial que mide la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 del Pacífico ecuatorial para clasificar eventos ENSO (NOAA Climate Prediction Center, 2023).
- **PEG (Plan de Expansión del Sistema de Generación)**: Instrumento técnico y estratégico elaborado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) de Guatemala que proyecta, con un horizonte de 15 años, las necesidades futuras de generación eléctrica del país. Su objetivo es garantizar el suministro confiable y eficiente de energía, promover la diversificación del mix energético, priorizar fuentes renovables y orientar la toma de decisiones sobre inversiones en nueva capacidad de generación (CNEE, 2023).
- **POE** (Precio de Oportunidad de Energía): Precio spot diario del mercado mayorista guatemalteco, que refleja el costo marginal de generar energía en condiciones de competencia (AMM, 2025).
- **Resiliencia energética**: Capacidad del sistema eléctrico de resistir, adaptarse y recuperarse ante perturbaciones externas como sequías o crisis energéticas (IEA, 2022).
- **Variabilidad climática**: Cambios naturales o inducidos en variables climáticas que ocurren en escalas de tiempo mensuales a decenales (WMO, 2021).

8.2 Tablas y figuras de referencia

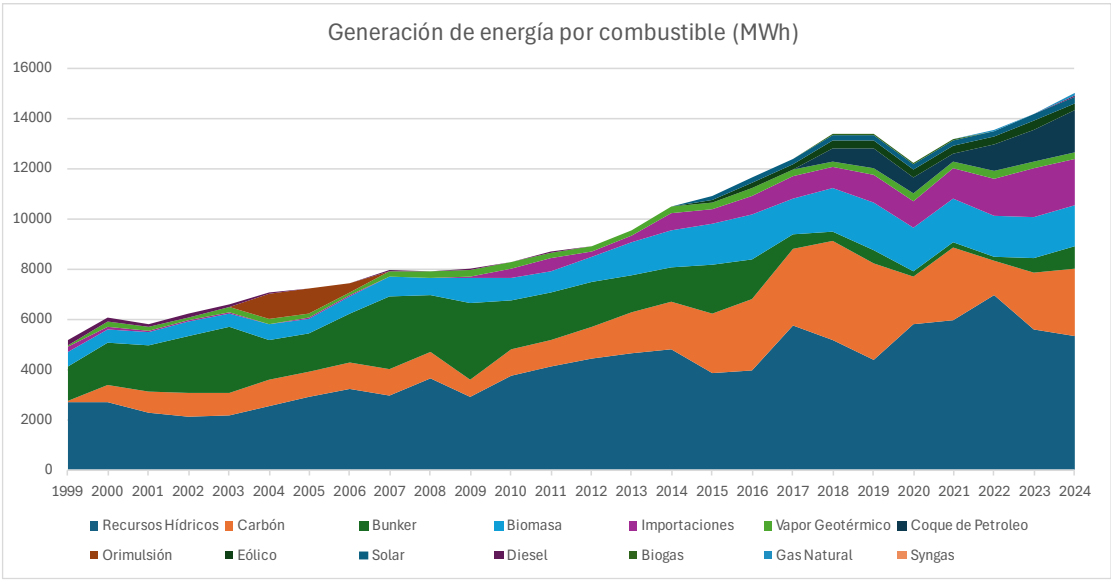


Figura 22: Evolución de generación de energía eléctrica por tipo de combustible en Guatemala

Tabla 8: Mayores plantas de generación hidroeléctrica de Guatemala (MEM, 2014)

Plantas generadoras	Unidades	Potencia efectiva (MW)	Ubicación	Departamento
CHIXOY	5	286.5770	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
RENACE II	4	107.1970	San Pedro Carchá	Alta Verapaz
HIDRO XACBAL	2	98.0080	Chajul	Quiché
PALO VIEJO	2	88.1920	San Juan Cotzal	Quiché
AGUACAPA	3	81.2830	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
RENACE III	3	67.0160	San Pedro Carchá	Alta Verapaz

Se utilizó para identificar geográficamente las ubicaciones de interés y correlacionarlas con las estaciones meteorológicas elegidas para el estudio.

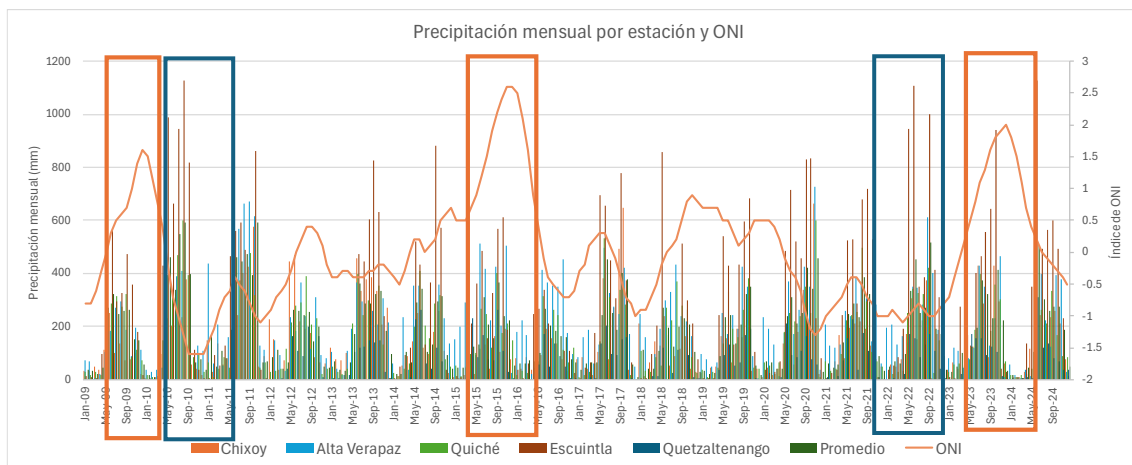


Figura 23: Serie temporal de precipitación mensual en diferentes estaciones meteorológicas y serie temporal ONI

Fuente de datos: datos meteorológicos por INSIVUMENH y el índice por NOAA, 2025. Se realizó un promedio de estos datos para el análisis climático ver metodología 4.1

Tabla 9: Generación y participación por tipo de recurso en 2024 en Guatemala

Recurso	Generación anual GWh (2024)	Participación
Geotérmica	275.04	2.10%
Eólica	286.43	2.18%
Solar	252.10	1.92%
Hidroeléctrica	5,334.17	40.66%
Biogás	18.20	0.14%
Biomasa	1,593.41	12.15%
Syngas	0.05	0.00%
Gas Natural	74.30	0.57%
Carbon Mineral	2,719.93	20.74%
Coque de Petróleo	1,656.35	12.63%
Bunker	871.17	6.64%
Diesel	36.27	0.28%
Total	13,117.41	100%

Con datos obtenidos del informe estadístico 2024 del ente operador (AMM, s.f.).