



POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD, MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

RPC-SO-30-NO.508-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

UBICACIÓN IDEAL DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS UTILIZANDO UN ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DIFUSO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

AUTORES:

ROGER ALEX MARTINEZ MINGA
FULTON MIJAIL RODRIGUEZ SOCOLA

DIRECTOR:

ARTURO GEOVANNY PERALTA SEVILLA

CUENCA – ECUADOR
2023

Autores:



ROGER ALEX MARTINEZ MINGA

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.

rmartinezm@est.ups.edu.ec

rmartinezminga@gmail.com



FULTON MIJAIL RODRIGUEZ SOCOLA

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.

frodriguezso@est.ups.edu.ec

fumiwap@hotmail.com

Dirigido por:



ARTURO GEOVANNY PERALTA SEVILLA.

Ingeniero Eléctrico.

Magister en Docencia Universitaria.

Magister en Gestión de Telecomunicaciones.

Doctor en Ingeniería.

aperaltas@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de prioridad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

FULTON MIJAIL RODRIGUEZ SOCOLA

ROGER ALEX MARTINEZ MINGA

Ubicación ideal de estaciones de carga para vehículos eléctricos utilizando un análisis de decisión multicriterio difuso y sistemas de información geográfica

UBICACIÓN IDEAL DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS UTILIZANDO UN ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DIFUSO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Roger Martínez Minga, rmartinezm@est.ups.edu.ec
Fulton Rodríguez Socola, frodriguezso@est.ups.edu.ec
Arturo Peralta Sevilla, aperaltas@ups.edu.ec
Maestría en Electricidad, Universidad Politécnica Salesiana

Resumen

Los vehículos eléctricos (VE) surgen como una innovadora y prometedora alternativa de movilidad para reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, la expansión de la infraestructura de carga para VE juega un rol importante para incrementar la adopción de VE por parte de los usuarios. En el ciclo de vida de una estación de carga para VE (ECVE), la selección de la ubicación más adecuada es crucial. Esto implica tener en cuenta algunos factores conflictivos. En ese sentido, el propósito de este trabajo es presentar un método para ubicar sitios apropiados para ECVE que combina técnicas de Sistema de Información Geográfica (GIS) con metodologías de toma de decisiones multicriterio (MCDA). En este caso, se utilizó la metodología FUZZY-TOPSIS para elegir la mejor ubicación de ECVE con el fin de representar la ambigüedad y la vaguedad resultantes de las evaluaciones subjetivas de los tomadores de decisiones. El sistema de índice de evaluación para la selección de la ECVE se construyó a partir de criterios de energía, socioeconómicos, de transporte y sociodemográficos asociados con un total de 10 subcriterios. Finalmente, utilizando el método FUZZY-TOPSIS, se clasificaron las alternativas para ubicar las ECVE. En el casco urbano de la ciudad de Cuenca se realizó una investigación empírica para confirmar la viabilidad y practicidad del método empleado. Adicionalmente, un análisis comparativo con otras metodologías combinadas demostró la estabilidad y confiabilidad del modelo.

Palabras clave:

Vehículos Eléctricos, Estación de Carga para Vehículos Eléctricos, Toma de Decisiones Multicriterio, Sistema de Información Geográfica

Abstract

Electric vehicles (EV) emerge as an innovative and promising mobility alternative to drastically reduce GHG emissions. Therefore, the expansion of EV charging infrastructure plays an important role in increasing EV adoption by users. In the life cycle of an EVCS, choosing the most suitable location is crucial. This involves considering some conflicting factors. In this regard, the purpose of this study is to present a method for locating appropriate sites for EVCS that combines Geographic Information System (GIS) techniques with Multi-Criteria Decision Making (MCDA) methodologies. In this case, Fuzzy TOPSIS approach was used to choose the best EVCS location to represent the ambiguity and vagueness resulting from decision makers' subjective assessments. The evaluation index system for EVCS site selection was built from energy, social-economic, transportation and socio-demographics criteria associated with a total of 10 sub-criteria. Finally, using the FUZZY-TOPSIS method, the EVCS site alternatives were ranked. In the urban area of the city of Cuenca, an empirical investigation was carried out to confirm the viability and practicality. Additionally, a comparative analysis with others combined methodologies demonstrated the model's stability and reliability.

Keywords:

Electric Vehicles, Electric Vehicles Charging Station, Multi-Criteria Decision Making, Geographic Information System.

I. INTRODUCCIÓN

En la conferencia sobre cambio climático celebrada en París en diciembre de 2015, un total de 195 países adoptaron por primera vez un acuerdo legal y universal para hacer frente al cambio climático, conocido como el Acuerdo de París. Este acuerdo establece un plan de acción mundial para mantener la temperatura del calentamiento global muy por debajo de 2°C de los niveles preindustriales [1]. Este ambicioso plan exige una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que iniciaron en el año 2020. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la concentración de GEI en la atmósfera, a largo plazo, debería limitarse a unas 450 ppm de dióxido de carbono (CO₂) [2].

En la actualidad, gran parte de las emisiones de GEI proceden del sector del transporte, concretamente de los motores de combustión interna (MCI) utilizados por los vehículos convencionales [2]. Este sector es responsable de una cuarta parte de las emisiones mundiales de GEI, según la AIE. Además de este hecho, al quemar combustibles fósiles, los motores a combustión interna (MCI) liberan contaminantes nocivos para la salud que degradan considerablemente la calidad del aire. Entre los principales elementos nocivos se encuentran el (CO₂), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NOX), los hidrocarburos (HC) y las partículas (PM) [3]. En este sentido, los vehículos eléctricos (VE) surgen como una alternativa de movilidad innovadora y prometedora para reducir drásticamente las emisiones de GEI y los contaminantes nocivos generados por los vehículos con motor de combustión interna.

Al término del 2020 hubo 10 millones de VE en circulación en todo el mundo [4]. Según el Escenario de Desarrollo Sostenible de la AIE, en 2030 se necesitarán nada menos que 230 millones de vehículos eléctricos en todo el mundo para cumplir los objetivos climáticos del Acuerdo de París [5]. En todo el mundo se han introducido importantes incentivos económicos y nuevas políticas para alcanzar este objetivo. De hecho, los gobiernos de todo el mundo gastaron 14.000 millones de dólares en incentivos directos a las adquisiciones y devoluciones de impuestos para VE en 2020 [5], [6]. Entonces como se espera un aumento significativo de los VE, será necesario

aumentar y ampliar la infraestructura de carga para VE. La norma internacional IEC 61851, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI), la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) han caracterizado diferentes modos/niveles de carga: CA - Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3, y Corriente Directa CC - Nivel 4 [7].

La carga de nivel 1 es el método de carga más lento, pero suficiente para los conductores que cargan su vehículo durante la noche. Los cables de carga suelen venir con el vehículo y se conectan a un tomacorriente estándar de 120 V CA con una intensidad nominal de 15 A o 20 A. Este nivel de carga puede tardar de 8 a 16 horas en completarse y puede manejar una potencia de 1,4 a 1,9 kW y requieren equipo de instalación. Así, la carga de nivel 1 funciona bien para cargar en casa, en el trabajo o en cualquier lugar con un tomacorriente estándar y cuando se dispone de tiempo suficiente para cargar [8]. En este nivel no está disponible el soporte de carga para el control de la comunicación. El cargador de nivel 1 utiliza un conector estándar J1772, o Tesla, que puede conectarse a cualquier VE, directamente o mediante un adaptador.

La carga de nivel 2 es considerablemente más rápida que la de nivel 1, pero requiere la instalación de una ECVE. La ECVE requiere un circuito eléctrico monofásico independiente de 240 V/208 V CA con una corriente nominal de hasta 40 A para enchufarlo en un lugar privado. En el caso de lugares públicos se requiere un circuito eléctrico trifásico de 400 V CA con una capacidad de corriente de hasta 80A [8]. Por ello, las estaciones de nivel 2 se encuentran en muchos lugares públicos y de trabajo, pero también en los hogares. Este nivel de carga puede tardar entre 4 y 8 horas en completarse y puede manejar una potencia de 7,7 a 25,6 kW [8]. El cargador de nivel 2 utiliza conectores basados en las normas IEC62196-2 Tipo 1, IEC 62196-2 Tipo 2 y GB / T 20234.2 [9]. La carga de nivel 3, SAE implementa un nivel de carga rápida para cargar una batería de VE de 130 kW de capacidad, utilizando una conexión de 480 V CA de circuitos trifásicos con una corriente significativamente alta, habitual en ubicaciones comerciales e industriales.

Entonces, las áreas de descanso de las autopistas y los puntos de repostaje de las ciudades, como centros comerciales, aeropuertos, parques, hoteles, estaciones de gasolina y otros lugares públicos, son

apropiadas para instalar la carga de nivel 3. La carga de nivel 3 utiliza los sistemas de conectores CHAdeMO y Combined Charging System (CCS) [7].

La carga de nivel 4 o también llamada carga rápida de CC (CRCC) no es una carga adecuada para el hogar, y no todos los modelos de VE están equipados para ella. Las ECVE con CRCC están situados en centros comerciales, lugares públicos y, a menudo, a lo largo de rutas con mucho tráfico, lo que permite a los conductores de VE cargar sus vehículos más rápido y hacer viajes más largos. Esta CRCC puede manejar una potencia de 150 kW a 350 kW y soportar una tensión de hasta 800 V. Es importante mencionar que el tiempo de carga de CRCC es menor que otros niveles de carga [7]. La tabla 1 resume las principales características de las estaciones de carga analizadas según la norma SAE J1772 [7].

infraestructura para ECVE y la autonomía restringida [11][12].

Entre las barreras técnico-económicas mencionadas, el escaso desarrollo de la infraestructura pública de carga es la barrera con mayor impacto para incrementar la introducción de VE [13].

En este sentido, una infraestructura de carga cómoda, eficiente y económica para los VE aumentaría la demanda de VE por parte de los clientes e impulsaría la industria de los VE.

La ubicación óptima de la ECVE es un factor significativo para la expansión del uso de VE y tiene un impacto importante en la red de distribución de energía eléctrica, red de tráfico de la ciudad, la calidad del servicio y el funcionamiento eficiente de la ECVE.

Tabla 1. Niveles de carga de ECVE [7]

Nivel de Potencia	Voltaje y Corriente	Ubicación del cargador	Lugar de carga	Max. Potencia (kW)	Tecnología Vehículo	Posible control de carga	Tiempo carga (hrs)	Interfaz suministro de energía
1	120 VAC - 15 A	1 fase A bordo	Casa u oficina	1.4	VEEHs (5–15 kWh)	No	4-11	De conveniencia en puntos de venta
	120 VAC - 20 A			1.9	VEs (16–50 kWh)		11-36	
2	240 VAC - 40 A	1-fase/3-fases A bordo	Privado	4	VEEHs (5–15 kWh)	Si	1-4	Equipo para suministro de energía del vehículo eléctrico (ESVE)
	400 VAC - 80 A			8	VEs (16–30 kWh)		2-6	
				19.2	VEs (3–50 kWh)		2-3	
3	208 VAC - 80 A o 200 A	3-fases-externo	Puntos de venta públicos	38.4	VEs (20–50 kWh)	Si	0.4–1	ESVE
	600 VAC - 80 A o 200 A			130			0.2–0.5	
4	400 – 800 VDC	externo	Autopista	50 - 500	VEs (50 kWh y superior)	Si	0.1-0.2	ESVE

Según [10], la norma J1772 es el cargador más utilizado en EE.UU., seguido del cargador Tesla y CHAdeMO. En cambio, en la UE, Mennekes es el cargador más utilizado, y su uso sigue aumentando. En el mercado asiático, por ejemplo, en China, el cargador chino GB/T se ha convertido en el más utilizado, seguido de cerca por el cargador CHAdeMO, que es el más utilizado en Japón.

A pesar del rápido aumento en el uso de vehículos eléctricos enchufables, todavía existen algunas barreras técnico-económicas que limitan la integración de los VE, tales como el alto costo de adquisición, los largos tiempos de carga, la falta de

Por lo tanto, es esencial establecer una metodología adecuada para determinar los potenciales o adecuados emplazamientos para una ECVE con el fin de motivar la demanda de VE por parte de los consumidores [14].

La selección del emplazamiento de una ECVE requiere el análisis de múltiples factores conflictivos, tangibles e intangibles, como los económicos, medioambientales, energéticos, geográficos y de transporte [15].

Con algunos criterios conflictivos tanto tangibles como intangibles; la localización de un emplazamiento adecuado para construir una ECVE

puede considerarse un complejo problema de toma de decisiones multicriterio (TDMC) [16]. Los problemas de TDMC son abordados por un grupo de investigadores expertos en las distintas áreas afines al estudio que evalúan las alternativas más adecuadas en función de sus criterios individuales y las combinan en una evaluación global [17]. Por lo tanto, para resolver los problemas de TDMC se requieren métodos de análisis de decisiones multicriterio (ADMC).

Los métodos ADCM facilitan la identificación y priorización de emplazamientos alternativos y son eficaces para hacer frente a la falta de datos válidos teniendo en cuenta factores complejos y conflictivos [18]. Entre estos métodos se utilizan generalmente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), el Proceso Analítico de Redes (ANP), el Método del Mejor Peor (BWM), la Técnica de Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS), la Combinación Lineal Ponderada (WLC) y el Método de Organización del Ranking de Preferencias para el Enriquecimiento de las Evaluaciones (PROMETHEE) [19].

Los autores [20] aplicaron una combinación de técnicas AHP y TOPSIS para seleccionar la ubicación más adecuada para una ECVE. En [21] se propone un sistema de decisión basado en el método PROMETHEE combinado con el modelo de nube para la selección de emplazamientos ECVE. En la práctica, sin embargo, debido a la ambigüedad e intangibilidad de los juicios cualitativos humanos y al hecho de tratar con información vaga, imprecisa e incierta, algunos factores no pueden medirse con valores precisos. Así, esta metodología en combinación con la lógica difusa permite considerar criterios que no pueden ser medidos por un valor numérico sino por valores difusos, como la armonización de los VE con el desarrollo de la planificación vial urbana y la red eléctrica [22].

Además, la eficacia de los métodos ADCM depende de la calidad y fiabilidad de los datos utilizados para generar los mapas de criterios. En este sentido, los sistemas de información geográfica (SIG) proporcionan capacidades únicas para el análisis espacial, las transformaciones de proyección, la gestión y la visualización de datos (vectoriales, ráster, atributos) derivados de diferentes fuentes [23].

A. Revisión bibliográfica

En los últimos años, algunos estudiosos han resuelto el problema de la localización de ECVE integrando metodologías TDMC, teoría difusa y SIG. Zhou et al. 2020 [24] propusieron un método ADCM basado en SIG para la decisión de localización de estaciones de carga fotovoltaica (PVCS) en el que los pesos de los criterios subjetivos y objetivos se determinan con métodos TDMC apoyados por información SIG y se clasifican con TODIM.

El conjunto de términos lingüísticos difusos vacilantes (HFLTS) se utiliza para recoger la información de evaluación de los criterios subjetivos cualitativos. Para verificar la fiabilidad de este modelo práctico utilizado en el estudio de [24], las clasificaciones se compararon con dos métodos maduros y estables:

Técnica de Preferencia de Orden por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS) y VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje (VIKOR).

En este documento se han utilizado factores económicos, técnicos y sociales para determinar la ubicación de los PVCS.

Otros criterios importantes como el transporte, la energía y la socio-demografía desempeñan un papel significativo en la adopción de VE y deben tenerse en cuenta para determinar la ECVE [25], [26].

Erbaş et al. 2018 [26] considerando la incertidumbre de la evaluación subjetiva aplicaron una metodología de Análisis de Decisiones Multicriterio Difuso basado en SIG (ADMD) basado en SIG) para abordar la selección de un emplazamiento EVCS óptimo basado en el Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP) y TOPSIS. Esta metodología sólo es eficaz para determinar la ECVE en el entorno urbano y no para los puntos de carga de VE en carretera [27].

Este trabajo no tiene en cuenta los factores sociodemográficos y energéticos que influyen en la adopción masiva del VE y, por tanto, en la determinación de la ECVE. Kaya et al. 2020 [28] aplicaron una metodología TDMC basada en SIG para optimizar las ubicaciones alternativas y actuales de los taxis eléctricos.

Los criterios se ponderaron mediante AHP difuso y el análisis espacial se realizó con SIG, y las ubicaciones se clasificaron utilizando el Método de Organización de Clasificación de Preferencias para el Enriquecimiento de Evaluaciones (PROMETHEE) y VIKOR. Guo & Zhao et al.

2015 [22] emplearon un método de TDMC para la selección del emplazamiento de ECVE basado en un método TOPSIS para seleccionar la ubicación óptima de ECVE en un entorno difuso triangular desde la perspectiva de la sostenibilidad. Sin embargo, no se realizó un análisis espacial con SIG para determinar las alternativas de emplazamiento de la ECVE. Karaşan A, Kaya İ, Erdoğan M 2020 [29], desarrollaron una metodología MCDM de conjuntos difusos intuicionistas (IFS) basada en los métodos de laboratorio de ensayo y evaluación de decisiones (DEMATEL), AHP y TOPSIS para la evaluación de posibles ubicaciones de la ECVE. DEMATEL se ha utilizado para determinar las relaciones de dependencia de los criterios/factores. Zhao et al. 2016 [14] utilizaron para seleccionar el asiento óptimo de ECVE una metodología basada en el método Delphi difuso (FDM), la ponderación combinada y los métodos de análisis de relación gris difusa GRA-VIKOR desde una perspectiva de sostenibilidad ampliada. Guler et al. 2020 [30] propusieron una metodología SIG-TDMC integrada para encontrar emplazamientos ECVE adecuados. Aplicando técnicas SIG, se realiza previamente un análisis espacial para generar capas espaciales asociadas a los criterios. Con esta información, se utilizan los métodos AHP y AHP difuso para calcular las ponderaciones de los factores.

Luego, se calcula el índice de idoneidad mediante la Combinación Lineal Ponderada (WLC). Por último, las ubicaciones alternativas se clasifican mediante el método TOPSIS. Feng et al. 2021 [31] presenta un enfoque TDMC innovador que utiliza el método de peso de entropía lingüística (LEW) para determinar los pesos de los criterios y el diseño axiomático difuso (FAD) para seleccionar la ubicación más adecuada para una ECVE.

Considerar la probabilidad de éxito de cada criterio se traduce en mejorar significativamente, la probabilidad de éxito de la selección del sitio para una ECVE es la novedad de este método. Yagmahan et al. 2022 [32] desarrollaron un nuevo enfoque para una evaluación robusta de emplazamientos ECVE alternativos que integraba técnicas de agregación de grupos (GAT), métodos TDMC para clasificar ubicaciones alternativas y resultados de análisis de sensibilidad. Se utilizan dos grupos diferentes de GAT para obtener ponderaciones agregadas con AHP.

A continuación, se aplican dos métodos TOPSIS y MOORA (Optimización Multiobjetivo en base al

Análisis de Razones) para clasificar las ubicaciones alternativas. Por último, este método para clasificar las ubicaciones alternativas de ECVE a partir de los resultados de los métodos MCDM de grupo y el análisis de sensibilidad de las perspectivas sostenibles. Ju et al. 2019 [33] proponen un marco innovador que utilizó la técnica FAHP y el método tradicional de proyección relacional gris GRP para evaluar y seleccionar el emplazamiento óptimo de una ECVE en un entorno de imagen difusa.

La principal característica de esta metodología es captar la vaguedad de la percepción humana mediante la teoría difusa de la imagen.

De la revisión de la bibliografía analizada se puede identificar que:

1. La tabla 1 resume algunos trabajos previos que han utilizado métodos TDMC para la localización adecuada de ECVE. La mayoría de estos trabajos no integra los SIG en su metodología. La eficacia de los métodos ADMC depende de la calidad y fiabilidad de los datos utilizados para generar los mapas de criterios. Los SIG ofrecen capacidades únicas para el análisis espacial, las transformaciones de proyección, la gestión y las visualizaciones de datos [23].
2. Cuando se adopta el método ADMC, la mayoría de las metodologías solo consideran las variables espaciales o las socio-demográficas pero no ambas. Por lo tanto, no se ha utilizado un análisis con factores espaciales y variables sociodemográficas.
3. Por último, el requisito eléctrico no se tiene en cuenta en el análisis de los estudios anteriores a pesar de que desempeña un papel fundamental para la planificación racional de ECVE [30], [36].

Tabla 2. Resumen de las principales características de los trabajos anteriores.

Metodología TDMC/ADMC	Métodos basados en SIG	Lugar caso estudio	Criterios						Ref.
			Tec	Eco	Soc	Amb	Tr	Re	
Conjunto de términos lingüísticos difusos vacilantes (Hesitant fuzzy linguistic term set-HFLTS) y TODIM	✓	Beijing, China	✓	✓	✓	✓			[24]
Proceso Jerárquico Analítico Difuso (Fuzzy analytical Hierarchy Process FAHP) and TOPSIS	✓	Ankara, Turquía		✓		✓	✓		[26]
FAHP, Método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations-PROMETHEE) y método VIKOR (VišeKriterijska Optimizacija I Komoromisno Resenje -VIKOR)	✓	Anatolian, Turquía		✓	✓	✓	✓		[28]
Método Fuzzy TOPSIS		Beijing, China		✓	✓	✓			[22]
Método DEMATEL (Decision-making trial) and evaluation laboratory-DEMATEL), AHP y TOPSIS		Istanbul, Turquía	✓	✓	✓	✓	✓		[29]
Método Fuzzy Delphi (Fuzzy Delphi method-FDM), Combinación ponderada y análisis de relación gris difusa (fuzzy grey relation analysis GRA-VIKOR)		Tianjin, China	✓	✓	✓	✓			[14]
AHP, fuzzy AHP Combinación Lineal Ponderada (Weighted Linear Combination-WLC) y TOPSIS	✓	Istanbul, Turquía		✓	✓	✓	✓		[30]
Método Entropía Lingüística Ponderada (Linguistic entropy weight -LEW) y diseño axiomático difuso (fuzzy axiomatic design -FAD)		Chengdu, China	✓	✓	✓	✓		✓	[31]
Técnicas integradas de agregación de grupos (Integrated group aggregation techniques-GATs) con AHP, métodos TOPSIS y MOORA		Bursa, Turquía	✓	✓	✓	✓			[32]
Técnica FAHP y Método convencional proyección relacional gris (traditional grey relational projection GRP) en un entorno de imagen difusa		Beijing, China	✓	✓	✓	✓			[33]

Nota: Tec, Eco, Soc, Amb, Tr, y Re significan Tecnología, Economía, Sociedad, Medio Ambiente, Transportación y Recursos (utilización y reciclaje), respectivamente.

B. Contribuciones

Para abordar los problemas expuestos en el análisis anterior, este estudio contribuye a la bibliografía de la siguiente manera:

1. A diferencia de las investigaciones previas sobre localización de ECVE, la presente investigación propone un método ADCM basado en SIG que integra factores económicos, geográficos y eléctricos para la selección de ECVE.
2. A diferencia de las investigaciones que anteceden, la presente investigación integra el factor sociodemográfico, que juega un rol decisivo en la adopción masiva de VE para determinar la ECVE.
3. En la presente investigación se consideró la densidad de carga eléctrica en el análisis para determinar la ubicación adecuada de las ECVE.

II. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

A. Determinación del problema

La tasa de adopción del VE podría verse influida por la densidad geográfica de la infraestructura de carga [37]. En general, la instalación de unidades públicas de carga en destinos populares puede ayudar a aliviar la ansiedad de los consumidores

por la autonomía e impulsar la adopción del VE. Pero, la decisión de ubicación de la infraestructura de carga pública se ve afectada por factores que influyen directa o indirectamente en ella [38]. La decisión sobre la ubicación de la instalación de ECVE depende de las características geográficas, las preferencias de movilidad, el interés del vehículo en la red y las restricciones espaciales. Las características geográficas implican la proximidad a los accidentes, la topografía y los criterios medioambientales. Las preferencias de movilidad están relacionadas con las condiciones del tráfico como la accesibilidad y las pautas de circulación. En la búsqueda de la disponibilidad del servicio, se requiere una gran demanda de servicio. Prever la adopción del VE aborda la gran demanda del plan de servicios. La revisión de la literatura sugiere que los criterios sociodemográficos desempeñan un papel importante en el análisis de los posibles usuarios de nuevas tecnologías como los VE. El perfil de los potenciales usuarios puede analizarse con la Regresión Ponderada Geográficamente (GWR), que estudia las características y el perfil de los usuarios de estufas eléctricas. Las restricciones espaciales también son una consideración importante y están asociadas al uso del suelo, la normativa medioambiental y la propiedad de la tierra. Por ejemplo, algunas zonas pueden tener requisitos diferentes en relación con los terrenos de propiedad privada y obtener permisos para utilizarlos puede ser más difícil en algunos casos. Si se tienen en cuenta las restricciones espaciales, es posible identificar las zonas donde pueden ubicarse las ECVE cumpliendo la normativa pertinente y minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente y la comunidad circundantes.

B. Definición de criterios

La selección de los criterios se hizo tomando en cuenta las propuestas de las referencias analizadas, los expertos en las distintas áreas afines al estudio y los autores; han incluido una combinación de variables sociodemográficas y factores espaciales. Los factores que se tienen en cuenta para seleccionar la ubicación de las ECVE son: factores económicos, viabilidad técnica y atributos medioambientales. Los factores y criterios de decisión sobre la localización se clasifican en cuatro criterios principales y están resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Categorización de los criterios

Criterios
1: Energía:
Subestaciones Eléctricas
Gasolineras
ECVE existentes
Densidad energética
2: Social y económico:
Centros comerciales
Centros sanitarios
3: Transporte:
Carreteras principales
4: Datos sociodemográficos:
Gastos de seguro
Envejecimiento del hogar
Materiales de construcción

1. Criterios de energía

Subestaciones eléctricas. El grado de pérdida de potencia, la confiabilidad del suministro y el costo del proyecto depende de la distancia de la estación desde el punto de conexión a la subestación eléctrica. Por lo tanto, las zonas adecuadas para las ECVE son las cercanas a las subestaciones eléctricas.

Gasolineras. La presencia de gasolineras refleja una capa con una buena distribución de las instalaciones en toda la zona en función del flujo del tráfico. Por lo tanto, la ubicación ideal de la estación de carga debe estar cerca de estos puntos de suministro.

ECVE actual. La presencia de ECVE existentes reduce el número de nuevas estaciones que hay que construir en el sentido de dar un mejor uso de los recursos. La ECVE proyectada debe situarse lo más lejos posible de los ECVE existentes.

Densidad de energía. La adopción más probable de VE se da en los estratos residenciales de alto consumo de energía. Desde esta perspectiva, la necesidad de estaciones de carga es mayor en las zonas donde la densidad de carga es elevada. Por tanto, cuanto mayor sea la densidad es mejor

2. Criterios sociales y económicos

Centros comerciales. Los centros comerciales atraen aparcamientos de corta, media y larga duración. Las zonas más adecuadas para la ECVE

son las cercanas a centros comerciales, cadenas de tiendas y comercios minoristas.

Instalaciones sanitarias. En cuanto a los campus médicos, los hospitales y las clínicas de salud disponen de un aparcamiento adecuado las 24 horas del día para visitantes, empleados y no empleados. Los propietarios de VE pueden beneficiarse de las ECVE situados cerca de los centros sanitarios.

3. Criterios de transporte

Carreteras principales. Las ECVE tienen que estar conectados con un gran número de carreteras en un tiempo de viaje corto y tener una buena disponibilidad/acceso rápido. Un emplazamiento para ECVE debería estar situado cerca de las carreteras principales. Cuanto más cerca, mejor.

4. Criterios sociodemográficos

Gastos de seguro. Si aumenta el costo del seguro de las personas de un hogar, aumentan las probabilidades de que un miembro de este hogar adopte nuevas tecnologías. La capa del mapa (factor) se crea utilizando los costos de seguro de los distritos. Es más adecuado, si el lugar tiene una tasa elevada de contribución al seguro social IESS.

Nuevas viviendas. Los propietarios de nuevas casas, edificios están a favor de adquirir nueva tecnología. En otras palabras, las personas que viven en edificios nuevos tienen más probabilidades de adoptar un VE. La capa del mapa se elabora contabilizando la cantidad de casas hipotecadas en cada distrito.

Materiales de construcción. Los materiales de construcción considerados como factor económico parecen tener un impacto positivo como predictor de la adopción de nuevas tecnologías. La puntuación de la capa se obtiene contabilizando las viviendas con pisos de alta calidad.

C. Análisis de los modelos de Regresión Ponderada Geográficamente (GWR)

Determinar los factores causantes de un fenómeno mediante la observación de patrones espaciales podría resolverse a través del análisis SIG explicativo. La regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) es una técnica habitual para identificar esos factores que ayudan a comprender

qué contribuye a los fenómenos espaciales (factores que subyacen a los patrones espaciales). Por lo tanto, OLS es el punto de partida adecuado para todos los análisis de regresión espacial.

La regresión OLS es un método estadístico para evaluar la relación entre variables a partir de datos y tendencias. La ecuación de regresión (1) cuantifica los factores clave que contribuyen a un fenómeno. En el análisis de regresión, hay una variable dependiente y una o varias variables independientes denominadas variables explicativas que influyen o contribuyen a la variable dependiente.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Donde, y es la variable dependiente que representa el fenómeno que se está modelizando. X es una o un conjunto de variables utilizadas para explicar la variable dependiente.

Coefficientes de regresión β son los valores asociados a cada variable independiente que representan la fuerza de la relación entre la variable dependiente y las independientes. β_0 es el valor esperado para la variable dependiente si todas las variables independientes son cero. Los valores residuales o el error aleatorio son representados por el término ε que indica una medida de la diferencia entre los valores observados y los modelizados.

Los coeficientes pueden indicar una relación positiva, negativa o nula entre las variables dependientes e independientes. Cuanto mayor sea el coeficiente, más fuerte será la relación. A medida que aumenta el valor de la variable independiente, también lo hace el de la variable dependiente para la interrelación positiva y disminuye cuando es negativa.

La regresión OLS proporciona un modelo global a través del espacio geográfico de la variable dependiente. Significa que, una sola ecuación de regresión representa toda la zona de estudio, asumiendo así que las relaciones son fijas. Es el núcleo para realizar varios tipos de análisis de regresión a varios diagnósticos, incluyendo cómo cada variable independiente está contribuyendo al modelo.

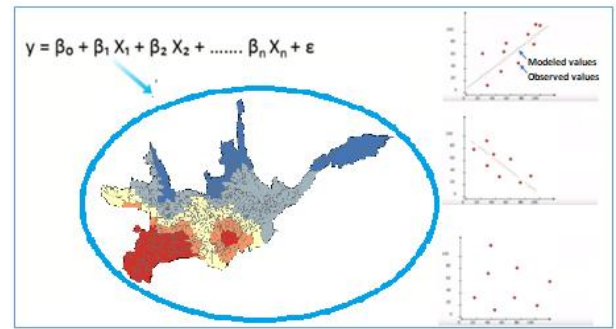


Fig. 1. Modelo de regresión OLS para un conjunto de datos en el área de estudio.

La fig. 1 muestra las variables referidas al espacio geográfico. Un tipo de análisis de regresión espacial denominado regresión ponderada geográficamente (GWR), es una técnica que permite evaluar cómo cambia la relación de las variables socioeconómicas a lo largo del espacio. La GWR evalúa un modelo de relación local ajustando una ecuación de regresión a cada distrito en toda una zona de estudio para explorar el fenómeno espacial que se intenta comprender. Las variables socioeconómicas del censo de población local y la influencia de las zonas colindantes calculan las áreas en las que los residentes son posibles compradores de tecnología eléctrica de uso final ($Y_{s,t,d}$). Se construyen ecuaciones separadas para cada distrito utilizando la ecuación (2).

$$Y_{s,t,d} = \beta_{s,t,d}^1 X_d^1 + \beta_{s,t,d}^2 X_d^2 + \dots + \beta_{s,t,d}^k X_d^k + \varepsilon_{s,t,d} \quad (2)$$

Donde X_d^k es una variable k de características socioeconómicas de la población en el distrito d , $\varepsilon_{s,t,d}$ es el residuo entre los valores $Y_{s,t,d}$ y $Y_{s,t,d}^{Obs}$, $\beta_{s,t,d}^k$ se calculan como sigue en la ecuación (3).

$$\beta_{s,t,d}^k = \left(x_d^{kT} W_d x_d^k \right)^{-1} x_d^{kT} W_d Y_{s,t,d}^{Obs} \quad (3)$$

Donde W_d es una matriz cuadrada como se expresa en la ecuación (4).

$$W_d = \begin{bmatrix} W_{d,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{d,2} & & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{d,j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los elementos diagonales $W_{d,j}$ son los pesos que relacionan la proximidad espacial entre distritos en el área de estudio. Estos valores dependen de la forma y la extensión de todos los barrios utilizados

para cada ecuación de regresión local que se analice. Se calculan utilizando un método gaussiano y bicuadrado para controlar la suavidad del modelo de núcleo. Las herramientas SIG, como ARCGIS y GEODA, pueden utilizarse para calcular los parámetros $W_{d,j}$, $\beta_{s,t,d}^k$ y $Y_{s,t,d}$.

D. Definición de reglas del modelo difuso

Un conjunto difuso es una clase con un conjunto de grados de pertenencia [39]. Así, un conjunto difuso A en un universo referencial de discurso X se caracteriza por una función de pertenencia A , que asocia a cada elemento $x \in X$ un número real $A(x) \in [0,1]$, teniendo la interpretación $A(x)$ como el grado de pertenencia de x en el conjunto difuso A . En esta situación, $A(x) = 1$ significa la plena pertenencia de x a A , mientras que $A(x) = 0$ significa la no pertenencia. Un conjunto difuso se identifica con su función de pertenencia. Otras notaciones que se suelen utilizar son las siguientes $\mu_A(x) = A(x)$. La función de pertenencia de un conjunto clásico $A \subseteq X$ puede definirse con su función característica como se expresa en la ecuación (5).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{por ende} \end{cases} \quad (5)$$

El número difuso triangular es una de las formas más populares de los números difusos. Puede definirse como un triplete $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, como se expresa en la ecuación (6). La fig. 2 muestra la función de pertenencia.

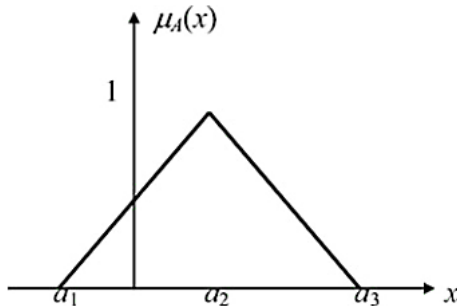


Fig. 2. Número difuso triangular $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha_1 \\ \frac{x-\alpha_1}{\alpha_2-\alpha_1}, & \alpha_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ \frac{\alpha_3-x}{\alpha_3-\alpha_2}, & \alpha_2 \leq x \leq \alpha_3 \\ 0, & x > \alpha_3 \end{cases} \quad (6)$$

Suponiendo dos números difusos triangulares $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ y $B = (b_1, b_2, b_3)$, se cumplen las siguientes propiedades:

1. El resultado de su suma o resta también es un número difuso triangular
2. El resultado de su multiplicación o división no es un número difuso triangular. Sin embargo, podemos asumir como valor de aproximación un número difuso triangular.
3. La operación de máximo o mínimo no da como resultado un número difuso triangular.

La suma y la resta se expresan en la ecuación (7):

$$\begin{aligned} A(+)B &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)(+)(b_1 + b_2 + b_3) \\ A(+)B &= (\alpha_1 + b_1, \alpha_2 + b_2, \alpha_3 + b_3) \\ \text{Y} \\ A(-)B &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)(-)(b_1 + b_2 + b_3) \\ A(-)B &= (\alpha_1 - b_3, \alpha_2 - b_2, \alpha_3 - b_1) \end{aligned} \quad (7)$$

Una matriz difusa es una reunión de vectores, donde, un vector difuso es un determinado vector que incluye un elemento con valor entre 0 y 1. Así, las operaciones sobre las matrices difusas A y B dadas son:

Suma como se expresa en la ecuación (8).

$$A + B = \max[\alpha_{i,j}, b_{i,j}] \quad (8)$$

Producto máximo como se expresa en la ecuación (9).

$$A \cdot B = \max[\min(\alpha_{i,k}, b_{k,j})] \quad (9)$$

Producto escalar como se expresa en la ecuación (10).

$$\lambda A \quad (10)$$

Donde $0 \leq \lambda \leq 1$.

El cálculo de la distancia entre dos números difusos triangulares puede realizarse mediante el método del vértice.

$$d(A, B) = \sqrt{\frac{1}{3}[(\alpha_1 - b_1)^2 + (\alpha_2 - b_2)^2 + (\alpha_3 - b_3)^2]} \quad (11)$$

Las variables lingüísticas son aquellas cuyos valores representan información nítida en forma de palabras u oraciones en su contexto. Por ejemplo, "Edad" puede tomar los valores joven, no joven, viejo, muy viejo, etc., en lugar de 18, 25, 40, 65

[40]. Este tipo de variables se pueden representar bien mediante números difusos triangulares.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El método de análisis de idoneidad se formula como dos enfoques: (i) análisis espacial y (ii) toma de decisiones espaciales como se muestra en la fig. 3. En este sentido, la integración de estos dos campos, conocida como métodos SIG-ADMC, podría evaluarse mediante un gran número de variantes disponibles, como se indica en las siguientes subsecciones.

AHP-WLC, AHP-TOPSIS, AHP-VIKOR y FUZZY-TOPSIS. FUZZY-TOPSIS utiliza números difusos triangulares (trapezoidales) para representar el valor del criterio con la metodología TOPSIS convencional. Los decisores del método FUZZY-TOPSIS evalúan las ponderaciones de los criterios y las calificaciones de las alternativas mediante variables lingüísticas.

A. Combinación lineal ponderada (WLC)

WLC es una técnica utilizada para la puntuación de sitios dentro del enfoque de análisis espacial [41].

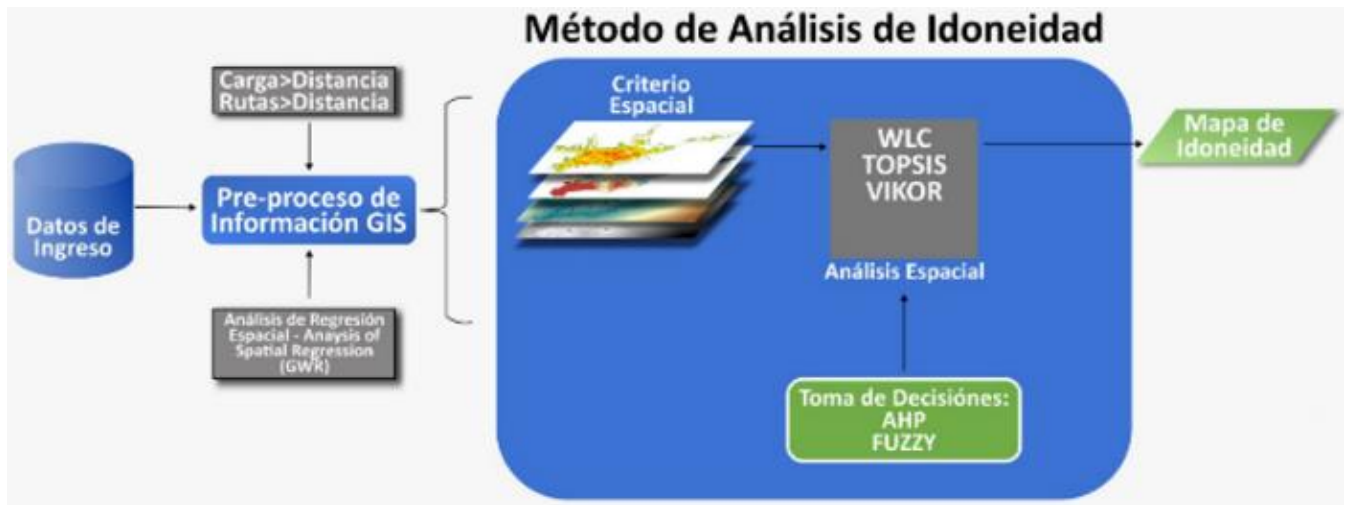


Fig. 3. Método de análisis de idoneidad.

En este trabajo se propone un método integrado de tres fases para ubicar una ECVE. Comienza con una fase de preprocesamiento en la que recopilamos toda la información geoespacial disponible para el área de estudio: subestaciones eléctricas, gasolineras, ECVE existentes, centros comerciales, instalaciones sanitarias, carreteras principales, costes de seguros, envejecimiento de los hogares, material de construcción y carga eléctrica.

A continuación, con los resultados obtenidos en la fase de preprocesamiento, se realizaron análisis espaciales de distancia y densidad. También se realizó un análisis de regresión para comprobar el impacto que tienen los factores sociodemográficos. Posteriormente, con el tratamiento previo de los factores espaciales, en la segunda fase se realiza un análisis espacial basado en las técnicas WLC, TOPSIS y VIKOR. Además, en la segunda fase se establecen las ponderaciones a los criterios y subcriterios mediante la técnica AHP y FUZZY. Por último, obtenemos un mapa de idoneidad mediante la aplicación de técnicas combinadas

WLC que consiste en un procedimiento de combinación de mapas, es decir, para cada ubicación geográfica (x_i, y_i) se realiza una suma ponderada de un conjunto de ponderaciones de criterios, w_1, w_2, \dots, w_n y valores de criterios, $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$. A continuación, la combinación de mapas consta de dos componentes: el peso del criterio w_k y una función de valor $v(a_{ik})$, como se expresa en la ecuación (12):

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k v(a_{ik}) \quad (12)$$

Donde, $V(A_i)$ es el valor de idoneidad. El subíndice "i" representa la *i-ésimo* alternativa en las coordenadas (x_i, y_i) . En un análisis de decisiones basado en un SIG raster, cada celda de una capa cartográfica se considera una alternativa. Si se consideran restricciones espaciales, en la ecuación (12) se amplía para representar el uso de las alternativas restringidas r_i de la siguiente manera, dando la ecuación (13):

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k v(a_{ik}) \cdot \prod r_i \quad (13)$$

B. Proceso de jerarquía analítica AHP

AHP es un método de clasificación para estimar las ponderaciones de cada criterio dentro de un enfoque de toma de decisiones espaciales.

En el contexto del AHP, requiere una comparación por pares sobre la base de una escala predeterminada, llamada "Escala Fundamental de Saaty" [42].

El responsable de la toma de decisiones emplea una matriz de comparación por pares con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias con respecto a un par de criterios. En la tabla 4 se explica la escala de valoración de Saaty.

Tabla 4. Escala Saaty.

Valor	Descripción
1	Dos elementos son iguales
2	Valor inter
3	La sentencia es leve a favor de uno
4	Valor inter
5	Sentencia significativa a favor de una
6	Valor inter
7	El predominio de un valor se confirma en la práctica
8	Valor inter
9	Dominio del más alto nivel

La matriz de comparación $C = [c_{kp}]_{n \times n}$ es recíproca, es decir, $c_{pk} = \frac{1}{c_{kp}}$ con valor de uno en todos los elementos diagonales. La escala de Saaty se utiliza para definir los pesos relativos c_{kp} para los criterios k -ésimo y p -ésimo mediante la comparación por pares. Una vez establecida la matriz de comparación por pares, el vector de pesos del criterio w puede calcularse mediante la ecuación (14).

$$Cw = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ \frac{1}{c_{12}} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{c_{1n}} & c_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \lambda_{max} \quad (14)$$

sujeto a

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n$$

$$0 \leq w_k \leq 1$$

Donde λ_{max} es el mayor valor propio de C . Uno de los métodos más utilizados para resolver la ecuación (14) es el procedimiento de promediado

sobre columnas normalizadas, propuesto por [42]. Así, las entradas de la matriz C se normalizan con la ecuación (15) y, finalmente, los pesos se calculan utilizando la ecuación (16) de la siguiente manera:

$$c_{kp}^* = \frac{c_{kp}}{\sum_{k=1}^n c_{kp}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$w_k = \frac{\sum_{p=1}^n c_{kp}^*}{n} \quad \forall p = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

La comparación por pares requiere medir la inconsistencia según el principio de transitividad. En general, el principio de transitividad puede definirse como sigue: un conjunto consistente de comparaciones por pares en el que el juicio humano tiene cierto grado de inconsistencia [41]. La razón de consistencia (CR) se expresa en la ecuación (17):

$$CR = \frac{\lambda_{max}}{RI(n-1)} \quad (17)$$

Donde, RI es el índice aleatorio, que depende del número de criterios que se comparen, es decir, para $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$, $RI = 0.00, 0.52, 0.89, \dots, 1.40$ respectivamente. La razón de consistencia, $CR < 0.1$, indica un nivel razonable de coherencia, y $CR \geq 0.1$ indica un juicio inconsistente en las comparaciones por pares. Si la razón de consistencia CR indica un juicio incoherente, la matriz de comparación por pares C debe reconsiderarse y revisar los valores originales c_{kp} , que se describe en la ecuación (15).

C. AHP-TOPSIS

El método TOPSIS compara la distancia de cada una de las alternativas a una solución ideal y anti ideal [43]. Utiliza una matriz de decisión con m alternativas A_1, \dots, A_m y n criterios, C_1, \dots, C_n . En primer lugar, cada alternativa se evalúa con respecto a cada uno de los criterios de n para formar una matriz de decisión $X = (x_{ij})_{m \times n}$. El vector de las ponderaciones de los criterios obtenido a partir del método AHP es $W = (w_1, \dots, w_n)$, donde $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. El algoritmo TOPSIS consta de seis pasos:

1. Normalización de la matriz de decisión.
2. Cálculo de la matriz de decisión normalizada ponderada.

3. Determinación de las soluciones ideal y anti ideal.
4. Cálculo de las medidas de separación
5. Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal.
6. Clasificación del orden de preferencia.

D. FUZZY-TOPSIS

La metodología FUZZY-TOPSIS adoptada del trabajo de Chen utiliza el método TOPSIS extendido para la toma de decisiones en grupo con variables lingüísticas [42]. En comparación con otros métodos FUZZY-TOPSIS, utilizamos el trabajo de Chen debido a su relativa simplicidad en conjunción con los pasos de TOPSIS presentados anteriormente. El algoritmo FUZZY TOPSIS consta de seis pasos:

1. Formar un comité de responsables de la toma de decisiones y, a continuación, determinar los criterios de evaluación.
2. Escoger las variables lingüísticas.
3. Realiza agregaciones.
4. Construir la matriz de decisión difusa y la matriz de decisión difusa normalizada.
5. Construir la matriz de decisión normalizada ponderada difusa.
6. Determinar la solución difusa ideal positiva (FPIS) y la solución difusa ideal negativa (FNIS).
7. Calcular la distancia de cada alternativa a FPIS y FNIS.
8. Calcular el coeficiente de proximidad de cada alternativa.
9. Clasificar las alternativas.

E. AHP VIKOR

VIKOR se considera eficaz en los casos que el responsable de la toma de decisiones no puede estar seguro de cómo expresar sus preferencias de forma coherente y consistente en las fases iniciales del diseño del sistema. Al igual que TOPSIS, el fundamento teórico de VIKOR se basa en la "cercanía al ideal", pero resulta útil cuando se incluyen criterios no conmensurables y conflictivos.

El método de VIKOR, denominado mco , se ha desarrollado para resolver los problemas DMC seleccionando la mejor alternativa, como se expresa en la ecuación (18).

$$mco_i = \{(f_{ij}(A_i), i = 1, 2, \dots, m), j = 1, 2, \dots, n\} \quad (18)$$

Donde, m es el número de alternativas factibles; n es el número de criterios; $A_i = x_1, x_2, \dots, x_m$ es la i -ésimo alternativa generada con ciertos valores de las variables del sistema x ; f_{ij} es el valor de la j -ésimo función criterio para la alternativa A_i , [44] determina el mejor y el peor valor, también conocidos como ideal positivo e ideal negativo, se expresa en la ecuación (19).

$$\begin{aligned} f_j^* &= \max_i f_{ij} \\ y \\ f_j^- &= \min_i f_{ij} \end{aligned} \quad (19)$$

Y para el cálculo de S_i y R_i , se expresan en las ecuaciones (21) y (22) respectivamente.

$$S_i = \sum_{j=1}^k w_j \frac{(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (20)$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (21)$$

Donde, S_i es A_i con respecto a todos los criterios calculados por la suma de la distancia para el mejor valor, y R_i es A_i con respecto al j -ésimo criterio, calculado por la distancia máxima del peor valor, con las ecuaciones (22), (23), (24) y (25), se logra calcular los siguientes valores Q_i que se detalla en la ecuación (26).

$$S^* = \min_i S_i \quad (22)$$

$$S^- = \max_i S_i \quad (23)$$

$$R^* = \min_i R_i \quad (24)$$

$$R^- = \max_i R_i \quad (25)$$

$$Q_i = v \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (26)$$

El procedimiento consta de nueve pasos:

1. Determinar el mejor y el peor valor de todas las funciones criterio.
2. Calcular los valores S_i y R_i .
3. Calcular los valores Q_i .
4. Clasificar las alternativas.
5. Proponer una solución de compromiso.

6. Determinar el intervalo de estabilidad ponderada para cada criterio.
7. Determinar las compensaciones.
8. Ajustar las compensaciones.
9. Terminación del algoritmo para la condición final.

IV. RESULTADOS

Según datos históricos del INEC en la sección de Transporte [45], hasta el 2021 el parque automotor ecuatoriano alcanzó los 2,5 millones, lo que representa un incremento del 7,4% respecto al año anterior y un crecimiento promedio anual del 5,6%. Particularmente, en la provincia del Azuay hasta el año 2021 se registraron 163598 vehículos matriculados, lo que representa el 6,45% del total de motorizados registrados en el país. Basado en [46] se han registrado 33 VE hasta el 2021 en la provincia del Azuay. En Cuenca, mientras que la población crece a un ritmo medio del 2% anual, el número de vehículos aumenta un 5% [47]. El 30 de septiembre de 2021, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) con el apoyo técnico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), presentó la Estrategia Nacional de Electromovilidad a los Sectores Estratégicos [48]. El documento presentado, "Estrategia Nacional de Electromovilidad para el Ecuador" (ENEME), estuvo a cargo de Hincio una consultora especializada, entre otras áreas, en movilidad sostenible. El objetivo de este documento es dirigir y orientar los esfuerzos en la estrategia nacional de electromovilidad y el uso de energías renovables. MTO ha realizado un importante avance en el que inicia un posible repunte en la comercialización de VE. La ENEM establece metas en las que para 2025 se alcanzarán 10,000 BEV; en 2030, 100,000 BEV y para 2040 la meta es llegar a 750,000 BEV, lo que equivale a entre 60% y 70% de los autobuses públicos, hasta 60% de los taxis, entre 30 y 40% de los camiones ligeros de carga y entre 20 y 25% de los vehículos ligeros del país, tal como se muestra en la tabla 5, esto trae beneficios como el ahorro en la salida de divisas por US\$6,400 millones, US\$700 millones por ahorro en emisiones de CO₂, US\$143 millones en ahorro por la reducción de otros gases de efecto invernadero [49].

Tabla 5. Metas de adopción de la electromovilidad en el parque automotor de cada segmento.

Año	Buses Públicos	Taxis	Camiones Ligeros de Carga	Vehículos Ligeros
2025 10.000 VE	3-5% 1.500 VE	2-4% 2.000 VE	1-3% 1.000 VE	0.2-0.5% 5.500 VE
2030 100.000 VE	20-30% 11.000 VE	15-20% 20.000 VE	5-10% 4.000 VE	3-5% 65.000 VE
2040 750.000 VE	60-70% 40.000 VE	55-60% 90.000 VE	30-40% 30.000 VE	20-25% 590.000 VE

El método propuesto se aplicó al sistema eléctrico de la "Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A." (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. El área de servicio de CENTROSUR que se muestra en la fig. 4 es de 30.234 km² (11,8 % del territorio ecuatoriano).

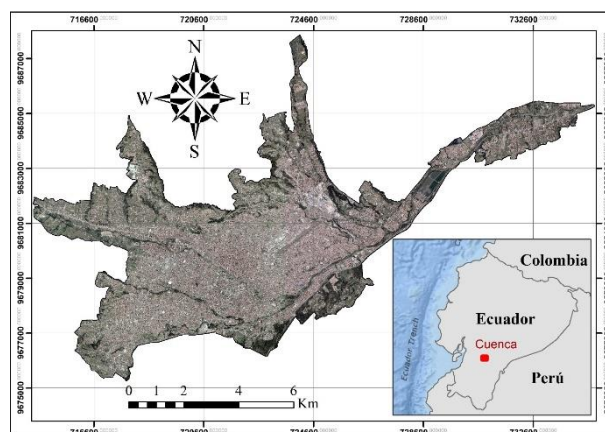


Fig. 4. Área de estudio, Cuenca - Ecuador.

El consumo de energía de los 393 953 clientes en 2018 (88 % residencial, 11 % comercial y 1 % industrial) fue de 1 074,10 GWh, con una demanda máxima de 194,93 MW. La zona de estudio, coloreada en oscuro en la fig. 4, representa alrededor del 75% de la demanda energética de la empresa. En esta zona, hay 214.082 consumidores para el año base 2018. El corte superior derecho de la zona corresponde al límite con otra utilidad vecina.

A. Análisis de regresión espacial

Para identificar la relación entre los datos referenciados espacialmente y los perfiles de los potenciales adoptantes, se utilizó la GWR para encontrar los criterios sociodemográficos más importantes. Mediante un proceso recursivo, se ejecutaron diferentes combinaciones de diversas variables sociodemográficas utilizando GWR para

determinar la fuerza de la relación. Las variables, conocidas como variables predictoras, se recopilan a partir de una revisión bibliográfica y de la disponibilidad de datos del censo poblacional. Algunos autores identifican variables sociodemográficas como determinantes en la adquisición de un VE. Por ejemplo [50] busca variables predictoras para encontrar los primeros adoptadores de VE, potenciales adoptadores y no adoptadores. Sugieren que los adoptantes reales o tempranos suelen tener un alto nivel educativo, mayores ingresos y viven en hogares más grandes. Sin embargo, dependiendo de dónde se haya desarrollado el estudio, el grado de influencia entre estas variables varía según la ubicación de los adoptantes [51]. Estos hallazgos deben ser corroborados por métodos de regresión espacial; por lo tanto, se utiliza GWR para determinar las variables clave de la adopción temprana de VE en la ciudad de Cuenca. El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) es el encargado de realizar el censo en Ecuador. Proporciona varios tipos de estadísticas de la población, y la más reciente se realizó en el año 2022. Para la recolección de datos, la superficie total de cada ciudad se divide en tramos que registran los recuentos de población. El censo recoge información sobre la edad, el sexo, el nivel educativo, las unidades de vivienda, el número de habitaciones, los materiales de construcción de los hogares, el acceso a los servicios básicos, etc. La ciudad de Cuenca tiene un total de 775 secciones censales. Sobre estas secciones censales, la herramienta GWR de ArcGIS [52] fue aplicada para encontrar la mejor combinación de variables predictoras. La herramienta GWR produce una tabla con los valores de diagnóstico del informe de ejecución de la herramienta. El coeficiente de determinación estadístico R^2 ajustado se utilizó para cuantificar el rendimiento del modelo. El valor de R^2 ajustado es un indicador de que tan bien las variables independientes modelan la variable dependiente. Un mejor modelo tiene un R^2 ajustado más alto para la misma variable dependiente pero diferentes combinaciones de variables independientes. La GWR se ejecutó con las variables predictoras como variables independientes y los adoptantes de cocinas eléctricas como variable dependiente. Mediante un proceso de regresión exploratoria, el modelo con la mejor combinación alcanzó un R^2 ajustado de 0,436. La puntuación R^2 ajustada indica que el

modelo explica aproximadamente el 44% de la variación en la adopción de cocinas de inducción. El modelo identifica tres variables predictoras que tienen un impacto significativo en la adopción de VE: los costos de los seguros, la antigüedad de los hogares y los materiales de construcción. Estas variables predictoras se considerarán más adelante como criterios espaciales.

B. Criterios y restricciones utilizados

Los criterios espaciales de la etapa de preprocesamiento se muestran en la fig. 5.

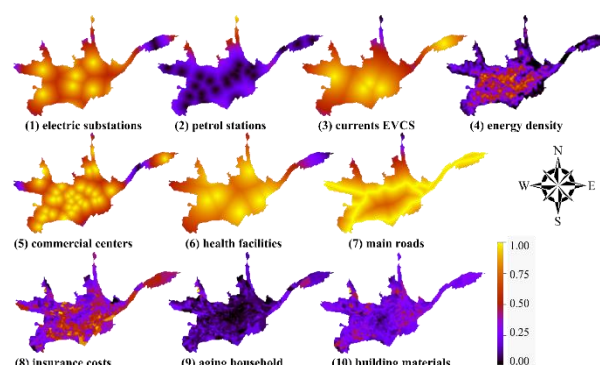


Fig. 5. Criterios espaciales.

Se utilizaron tres tipos de análisis espaciales: proximidad, densidad y regresión espacial. La proximidad es una función de la distancia euclidiana para áreas pequeñas. El criterio del entorno es una función de la densidad o de las estadísticas focales dentro de una vecindad. La regresión espacial permite modelizar, examinar y explorar las relaciones espaciales y puede ayudar a explicar los factores detrás de los patrones espaciales observados. En este trabajo se utilizaron las siguientes restricciones espaciales: aeropuertos, zonas militares, cursos de agua, ríos, parques, zonas recreativas, terrenos protegidos y gasolineras. Las capas se unen después de la normalización y revelan los sitios alternativos para el emplazamiento de ECVE.

C. Análisis comparativo

En esta investigación, la jerarquía del método AHP se compone de cuatro criterios principales: energía, social y económico, transporte y sociodemográfico. La fig. 6 muestra la jerarquía AHP de este estudio. La comprensión del experto en la toma de decisiones se expresa mediante AHP utilizando números crisp.

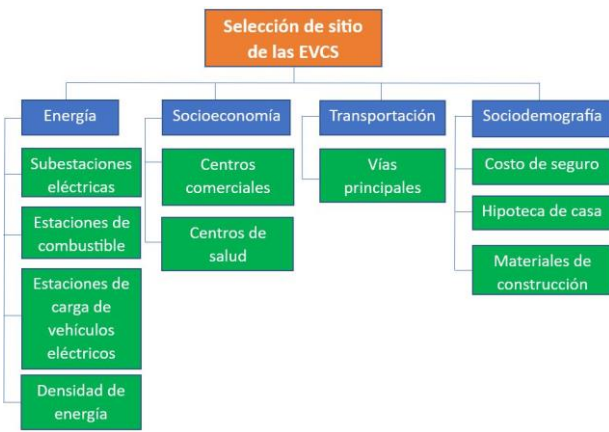


Fig. 6. El sistema de evaluación de las ubicaciones de los EVCS

Para determinar los pesos mostrados en la tabla 6, se requiere una comparación por pares sobre la base de una escala predeterminedada, llamada "Escala Fundamental de Saaty" [42]. El tomador de decisiones emplea una matriz de comparación por pares con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias con respecto a un par de criterios.

Tabla 6. Pesos relativos en la matriz recíproca

Criterios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1: Subestaciones eléctricas	1	5	3	1/2	1/4	6	1/2	1/6	1/3	1/2
2: Gasolineras	1/5	1	1/3	1/5	1/7	2	1/3	1/3	2	2
3: Corrientes EVCS	1/3	3	1	1/7	1/4	3	1/5	1/6	2	3
4: Densidad de energía	2	5	7	1	2	6	3	4	3	5
5: Centros comerciales	4	7	4	1/2	1	6	2	5	4	5
6: Instalaciones de salud	1/6	1/2	1/3	1/6	1/6	1	1/4	1/8	1/2	1/3
7: Carreteras principales	2	3	5	1/3	1/2	4	1	1/5	2	2
8: Costos de seguro	6	3	6	1/4	1/5	8	5	1	7	7
9: Envejecimiento del hogar	3	1/2	1/2	1/3	1/4	2	1/2	1/7	1	2
10: Materiales de construcción	2	1/2	1/3	1/5	1/5	3	1/2	1/7	1/2	1

Además, en el mismo procedimiento de selección de espacios para ECVE se les atribuye la siguiente ponderación relativa a los criterios espaciales: 0,08, 0,04, 0,06, 0,20, 0,02, 0,09, 0,05, 0,20, 0,04 y 0,22, mostrados en la fig. 7.

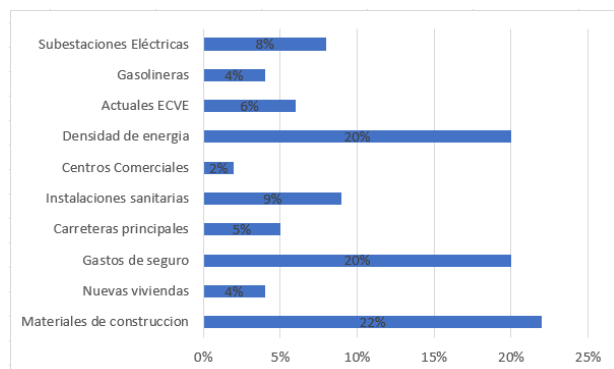


Fig. 7. Ponderación de los criterios espaciales.

Dado que es difícil evaluar estos criterios con precisión, se prevé que los tres expertos lo hagan utilizando un conjunto de términos lingüísticos. A

continuación, se obtienen las valoraciones lingüísticas de cada criterio por parte de los responsables de la toma de decisiones, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Calificación lingüística de las ponderaciones de los criterios

Responsabilidad en la Toma de decisiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1: Técnica	M	L	ML	VH	H	VL	M	H	L	L
2: Económica	VH	M	L	L	VH	H	M	ML	H	L
3: Social	M	H	L	ML	H	VH	VH	M	H	L

Los números de entrada se transforman en funciones de pertenencia difusas en el paso de fuzzificación para los criterios y sus pesos. Como resultado, la información y los números que deben procesarse se convertirán en conjuntos difusos y números. En la fig. 8, se emplean siete funciones de pertenencia triangulares: Muy alta (VH), Alta (H), Media alta (MH), Media (M), Media baja (ML), Baja (L) y Muy baja (VL).

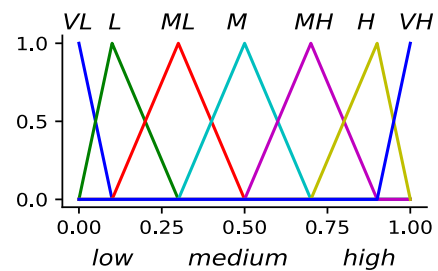


Fig. 8. Funciones de pertenencia triangulares.

Para demostrar la validez y aplicabilidad del modelo sugerido, se emplearon los métodos AHP-WLC, AHP-TOPSIS y AHP-VIKOR para el análisis comparativo. La fig. 9 demuestra la coherencia de los resultados de los algoritmos FUZZY-TOPSIS en comparación con los demás métodos aplicados en este estudio.

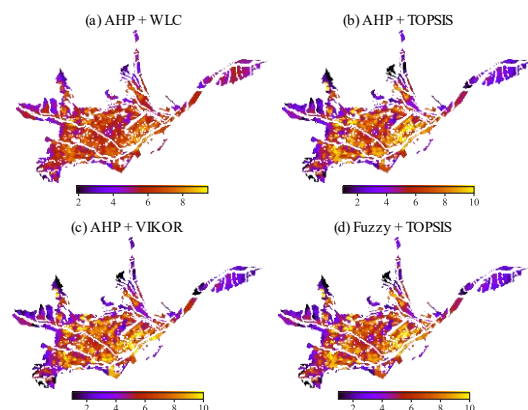


Fig. 9. Resultados ADMC con cada método.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo de investigación se ha aplicado una metodología que integra métodos ADMC, la teoría FUZZY y el SIG para el análisis espacial; en la selección de los sitios idóneos para las ECVE.

Como parte del proceso de selección, se construyó un sistema de evaluación que consiste en cuatro pilares fundamentales: criterios de energía, criterios socioeconómicos, criterios de transporte y criterio sociodemográfico. Estos cuatro criterios contienen cuatro, dos, uno y tres subcriterios respectivamente; que fueron escogidos en base a la literatura académica revisada y la información geográfica espacial disponible. Mediante un preprocesamiento de la información espacial obtenida de un censo poblacional del país, las variables sociodemográficas que influyen en la adopción de los VEs y consecuentemente en la ubicación de las ECVE son: seguro social, viviendas nuevas y materiales de construcción de las viviendas.

A fin de tratar la incertidumbre y la vaguedad de la información proporcionada por los expertos evaluadores, un método FUZZY-TOPSIS fue aplicado para determinar el sitio más idóneo para emplazar las potenciales ECVE. Los pesos de todos los subcriterios fueron juzgados por tres expertos en el ámbito técnico, económico y social

A diferencia de estudios similares anteriores, esta metodología integra criterios o factores sociodemográficos y densidad de carga eléctrica al problema de la localización de sitios idóneos para implementar ECVE.

Además, se contrastó con mapas de idoneidad con otras metodologías convencionales de ADMC en donde se observa la coherencia de los resultados obtenidos con el método FUZZY-TOPSIS.

Finalmente, mediante un análisis comparativo con otras metodologías combinadas (AHP+WLC, AHP+TOPSIS, AHP-VIKOR) se demostró la estabilidad y confiabilidad del método FUZZY+TOPSIS.

VI. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A., Empresa de

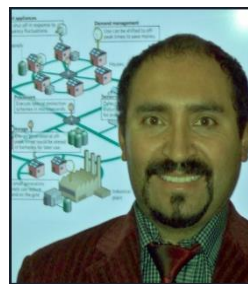
Distribución Eléctrica de Ecuador, la información facilitada y su colaboración.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UN Framework Convention on Climate Change, "Adoption of the Paris Agreement," Paris, 2015.
- [2] IEA, "World Energy Outlook," 2011.
- [3] Int. O. of M. V. Manufacturers, "Climate Change and CO2." Int. Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, France, May 2008.
- [4] N. Koch, N. Ritter, A. Rohlf, and F. Scarazzato, "When is the electric vehicle market self-sustaining? Evidence from Norway," *Energy Econ*, p. 105991, 2022, doi: 10.1016/j.eneco.2022.105991.
- [5] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2021 - Accelerating ambitions despite the pandemic," 2021. Accessed: May 06, 2022. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/1925380>
- [6] International Energy Agency, "Global EV Data Explorer," Articles, 2021. <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer> (accessed May 06, 2022).
- [7] G. F. Savari et al., "Assessment of charging technologies, infrastructure and charging station recommendation schemes of electric vehicles: A review," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 4. Elsevier, p. 101938, Apr. 05, 2022. doi: 10.1016/j.asej.2022.101938.
- [8] R. P. Narasipuram and S. Mopidevi, "A technological overview & design considerations for developing electric vehicle charging stations," *J Energy Storage*, vol. 43, p. 103225, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103225>.
- [9] L. G. González, E. Siavichay, and J. L. Espinoza, "Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 309–318, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.017.
- [10] M. Knez, G. K. Zevnik, and M. Obrecht, "A review of available chargers for electric vehicles: United States of America, European Union, and Asia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 284–293, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.013.
- [11] R. Riemann, D. Z. W. Wang, and F. Busch, "Optimal location of wireless charging facilities for electric vehicles: Flow-capturing location model with stochastic user equilibrium," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 58, pp. 1–12, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.022>.
- [12] W. Tu, Q. Li, Z. Fang, S. lung Shaw, B. Zhou, and X. Chang, "Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial-temporal demand coverage approach," *Transp Res Part C Emerg*

- Technol, vol. 65, pp. 172–189, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2015.10.004.
- [13] S. Á. Funke, T. Gnann, and P. Plötz, “Addressing the Different Needs for Charging Infrastructure: An Analysis of Some Criteria for Charging Infrastructure Set-up,” in *E-Mobility in Europe: Trends and Good Practice*, W. Leal Filho and R. Kotter, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 73–90. doi: 10.1007/978-3-319-13194-8_4.
- [14] H. Zhao and N. Li, “Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision-making approaches from an extended sustainability perspective,” *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 4, pp. 1–22, 2016, doi: 10.3390/en9040270.
- [15] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, “Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 102–110, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2223489.
- [16] S. Zambrano-Asanza, W. E. Chumbi, J. F. Franco, and A. Padilha-Feltrin, “Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Systems for Identifying Ideal Locations for New Substations,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, pp. 1–12, May 2021, doi: 10.1007/s40313-021-00738-5.
- [17] J. Saint, S., Lawson, *Rules for reaching consensus: A modern approach to decision making*. San Francisco: Pfeiffer, 1994.
- [18] E. Tercan, A. Eymen, T. Grul Urfalı, and B. O. Saracoglu, “A sustainable framework for spatial planning of photovoltaic solar farms using GIS and multi-criteria assessment approach in Central Anatolia, Turkey,” *Land use policy*, vol. 102, p. 105272, 2021, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105272.
- [19] S. Sisman, I. Ergul, and A. C. Aydinoglu, “DESIGNING GIS-BASED SITE SELECTION MODEL for URBAN INVESTMENT PLANNING in SMART CITIES with the CASE of ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2021, pp. 515–522. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVI-4-W5-2021-515-2021.
- [20] Ö. Kaya, K. D. Alemdar, T. Campisi, A. Tortum, and M. K. Çodur, “The development of decarbonisation strategies: A three-step methodology for the suitable analysis of current evcs locations applied to istanbul, turkey,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.3390/en14102756.
- [21] Y. Wu, M. Yang, H. Zhang, K. Chen, and Y. Wang, “Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the PROMETHEE method,” *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 3, p. 157, Mar. 2016, doi: 10.3390/en9030157.
- [22] S. Guo and H. Zhao, “Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective,” *Appl Energy*, vol. 158, pp. 390–402, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.082.
- [23] J. Malczewski, “On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches,” *Transactions in GIS*, vol. 4, no. 1, pp. 5–22, Jan. 2000, doi: 10.1111/1467-9671.00035.
- [24] J. Zhou, Y. Wu, C. Wu, F. He, B. Zhang, and F. Liu, “A geographical information system based multi-criteria decision-making approach for location analysis and evaluation of urban photovoltaic charging station: A case study in Beijing,” *Energy Convers Manag*, vol. 205, p. 112340, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112340.
- [25] M. Chandra, “Investigating the impact of policies, socio-demography and national commitments on electric-vehicle demand: Cross-country study,” *J Transp Geogr*, vol. 103, p. 103410, 2022, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103410.
- [26] M. Erbaş, M. Kabak, E. Özceylan, and C. Çetinkaya, “Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis,” *Energy*, vol. 163, pp. 1017–1031, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.140.
- [27] M. Mahdy, A. S. Bahaj, P. Turner, N. Wise, A. S. Alghamdi, and H. Hamwi, “Multi Criteria Decision Analysis to Optimise Siting of Electric Vehicle Charging Points—Case Study Winchester District, UK,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 2497, 2022, doi: 10.3390/en15072497.
- [28] Ö. Kaya, A. Tortum, K. D. Alemdar, and M. Y. Çodur, “Site selection for EVCS in Istanbul by GIS and multi-criteria decision-making,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 80, p. 102271, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102271.
- [29] A. Karaşan, İ. Kaya, and M. Erdoğan, “Location selection of electric vehicles charging stations by using a fuzzy MCDM method: a case study in Turkey,” *Neural Comput Appl*, vol. 32, no. 9, pp. 4553–4574, 2020, doi: 10.1007/s00521-018-3752-2.
- [30] D. Guler and T. Yomralioglu, “Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS,” *Ann GIS*, vol. 26, no. 2, pp. 169–189, 2020, doi: 10.1080/19475683.2020.1737226.
- [31] J. Feng, S. X. Xu, and M. Li, “A novel multi-criteria decision-making method for selecting the site of an electric vehicle charging station from a sustainable perspective,” *Sustain Cities Soc*, vol. 65, p. 102623, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102623.
- [32] B. Yagmahan and H. Yılmaz, “An integrated ranking approach based on group multi-criteria decision making and sensitivity analysis to evaluate charging stations under sustainability,” *Environ Dev Sustain*, 2022, doi: 10.1007/s10668-021-02044-1.
- [33] Y. Ju, D. Ju, E. D. R. Santibanez Gonzalez, M. Giannakis, and A. Wang, “Study of site selection of electric vehicle charging station based on extended GRP method under picture fuzzy environment,”

- Comput Ind Eng, vol. 135, pp. 1271–1285, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.07.048.
- [34] X. Iogansen, K. Wang, D. Bunch, G. Matson, and G. Circella, “Deciphering the factors associated with adoption of alternative fuel vehicles in California: An investigation of latent attitudes, socio-demographics, and neighborhood effects,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 168, p. 103535, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.tra.2022.10.012.
- [35] C. fei Chen, G. Zarazua de Rubens, L. Noel, J. Kester, and B. K. Sovacool, “Assessing the socio-demographic, technical, economic and behavioral factors of Nordic electric vehicle adoption and the influence of vehicle-to-grid preferences,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109692.
- [36] L. Wang, C. Yang, Y. Zhang, and F. Bu, “Research on multi-objective planning of electric vehicle charging stations considering the condition of urban traffic network,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11825–11839, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.08.242.
- [37] S. Árpád Funke, T. Gnann, and P. Plötz, “Addressing the different needs for charging infrastructure: An analysis of some criteria for charging infrastructure set-up,” *Green Energy and Technology*, vol. 203, pp. 73–90, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-13194-8_4.
- [38] Q. Zhang et al., “Factors influencing the economics of public charging infrastructures for EV – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 500–509, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.06.022.
- [39] B. Bede, *Mathematics of fuzzy sets and fuzzy logic*. Berlin: Springer, 2013.
- [40] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975, doi: 10.1016/0020-0255(75)90017-1.
- [41] R. C. Malczewski J, *Multicriteria decision analysis in geographic information science*, 2015th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [42] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, Resource allocation*, xiii. New York, United States: McGraw-Hill, 1980.
- [43] J. Papathanasiou and N. Ploskas, *Multiple criteria decision aid: methods examples and python implementations*. Springer, 2018.
- [44] Moghaddam Tavakkoli R., Mousavi S. M. and Heydar M., *An Inegrated AHP-VIKOR Methodology for Plant Location Selection*. Resource allocation, *IJE* 2011.
- [45] INEC, “Anuario de Estadísticas de Transporte, 2021,” Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). *Estadísticas de Transporte*, 2022. <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/transporte/>
- [46] “Estadísticas de Transporte (ESTRA)”, Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: www.ecuadorencifras.gob.ec
- [47] Diario El Mercurio, “Hay 64.199 vehículos matriculados en Cuenca,” 2022. <https://elmercurio.com.ec/2022/09/10/vehiculos-matriculados-en-cuenca/>
- [48] Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) con el apoyo técnico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “MTO socializa la Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador con sectores estratégicos,” 2021. <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-socializa-la-estrategia-nacional-de-electromovilidad-para-ecuador-con-sectores-estrategicos/> (accessed Sep. 29, 2021).
- [49] Hinicio, “Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador.” Consultoría 4. Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador (ENEM). Quito, Ecuador: MTO, Quito, p. 88, 2021. [Online]. Available: https://varusecuador.com/wp-content/uploads/2021/05/Estrategia_Nacional_de_Electromovilidad_Ecuador.pdf
- [50] A. Priessner, R. Sposato, and N. Hampl, “Predictors of electric vehicle adoption: An analysis of potential electric vehicle drivers in Austria,” *Energy Policy*, vol. 122, pp. 701–714, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.058>.
- [51] A. Namdeo, A. Tiwary, and R. Dziurla, “Spatial planning of public charging points using multi-dimensional analysis of early adopters of electric vehicles for a city region,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 89, pp. 188–200, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.032>.
- [52] A. P. 3.1, “How Geographically Weighted Regression (GWR) works,” ESRI, 2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/how-geographicallyweightedregression-works.htm> (accessed Apr. 17, 2023).



Arturo Geovanny Peralta Sevilla nació en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay en 1975. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana en 2002; recibió el grado de Magister en Gestión de Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica Salesiana en 2011; recibió el grado de Doctor en Ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín-Colombia en 2018. Su línea de investigación es la optimización, procesos estocásticos, planificación de redes eléctricas y de comunicaciones. Miembro del Grupo de Investigación de Telecomunicaciones y Telemática (GITEL). Es Profesor titular en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.



Roger Alex Martínez Minga nació en la ciudad de Machala, provincia de El Oro en 1984. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana en 2009. Su experiencia laboral incluye en compañías privadas, en CNEL EP en el área de planificación de redes eléctricas y en CELEC EP en el área de mantenimiento eléctrico. Su campo de interés es la operación y calidad de las redes inteligentes de distribución.



Fulton Mijail Rodríguez Socola nació en la ciudad de Machala, provincia de El Oro en 1991; recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana en el año 2015. Su experiencia laboral incluye empresas como CNEL EP, CELEC EP y la Empresa Eléctrica de Azogues donde actualmente ocupa el cargo de Director de Planificación y Tecnologías; su campo de interés es la planificación de la expansión del sector eléctrico mediante energías renovables.