

Distribución geoestadística de la accesibilidad vial en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, México



Colaboración

Isaac Fariás-Moreno; Peter Chung-Alonso; Alicia Cuevas-Muñiz; María Silvia del Rocío Covarrubias-Ruesga; Jorge Armando Gutiérrez-Valencia, Tecnm Nacional de México Instituto Tecnológico de Colima

Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2025

Fecha de aceptación: 11 de diciembre de 2025

RESUMEN: La accesibilidad urbana es un indicador de la integración efectiva del territorio urbano. En el marco de las ciudades sostenibles, la accesibilidad define el potencial de interacción entre centros de población y el espacio urbano, así como su conectividad, vitalidad y salubridad. Esta investigación propone una metodología enfocada al análisis geoestadístico de la accesibilidad a escala vial, que incluye variables socioambientales, de calidad ambiental y de la eficiencia morfológica. Su aplicación es en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, donde se detectó una tendencia semi radial, irregular y heterogénea de la accesibilidad. Se identificación de zonas altamente conectadas y sectores aislados, brindando criterios para su integración efectiva, así como parámetros para el desarrollo urbano sustentable.

PALABRAS CLAVE: Accesibilidad urbana, Ciudades Sostenibles, Análisis espacial, Indicadores Urbanos, Sistemas urbanos.

ABSTRACT: Urban accessibility is an indicator of the effective integration of urban areas. Within the framework of sustainable cities, accessibility defines the potential for interaction between population centers and urban space, as well as their connectivity, vitality, and health. This research proposes a methodology focused on the geostatistical analysis of accessibility at the road scale, which includes socio-environmental variables, environmental quality, and morphological efficiency. Its application is in the Colima-Villa de Álvarez Metropolitan Area, where a semi-radial, irregular, and heterogeneous accessibility trend was detected. Highly connected zones and isolated sectors are identified, providing criteria for their effective integration, as well as parameters for sustainable urban development.

KEYWORDS: Urban accessibility, Sustainable cities, Spatial analysis, Urban indicators, Urban systems.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y la expansión acelerada de los asentamientos humanos a nivel global, representan retos para la funcionalidad de las ciudades, sobre todo en ciudades en procesos de conurbación/metropolización, donde habita una de cada tres personas del planeta [1].

En México, las ciudades en el Sistema Urbano Nacional dan sustento a 87.3 millones de habitantes, o al 69.28% de la población nacional [2], donde el 85.45% de estos se concentran en zonas metropolitanas, cuya di-

nármica de crecimiento acelerado propicia la desigualdad, marginación y aislamiento en zonas o sectores vulnerados [3]. La presente investigación abona al ODS 11 «Ciudades y Comunidades Sostenibles» y 13 «Acción por el clima», al plantear métodos para analizar la accesibilidad como un índice de la eficiencia y compacidad urbana, cuyos efectos influyen en las dinámicas cotidianas de movilidad, y sobre la huella de carbono requerida para conectar áreas espacial funcionalmente desvinculadas.

La accesibilidad es una cualidad que define el potencial de interacción dentro de un sistema espacial [3, 4]. La accesibilidad urbana denota la integración y vinculación entre los centros de población y sus entornos, lo cual influye en la conectividad, vitalidad y salubridad integral en las ciudades [4, 5]. En los estudios urbanos se han definido los factores ambientales que promueven la accesibilidad, cuya naturaleza abarca la cercanía y diversidad de actividades así como preferencias perceptuales/subjetivas que condicionan la intensidad y frecuencia del uso de zonas o vías del espacio urbano [4, 6].

En términos espaciales, las ciudades poseen patrones distributivos y jerarquías asociados a la accesibilidad, definiendo su eficiencia para cohesionar los territorios, o, para identificar las áreas aisladas, marginadas y vulnerables [4]. Los estudios urbanos contemporáneos sobre la accesibilidad se bifurcan en el análisis de 1) la integración funcional de puntos de interés en el territorio urbano y 2) los aspectos físico-ambientales que influyen sobre la preferencia e intensidad de uso del espacio urbano, con diversas escalas (macro/micro) de análisis.

La vinculación espacial efectiva entre centros de población y el espacio urbano, ha sido uno de los enfoques teórico-metodológicos con un mayor impacto y consolidación, derivando en las «ciudades de 15 minutos», donde se parte del supuesto de una distancia máxima (~600-800 metros), dentro de la cual debe existir la disponibilidad de satisfactores vitales para las actividades cotidianas de la vida urbana. Con dichos principios, en trabajos recientes [5, 7, 8] se analizan los patrones espaciales para la articulación de los territorios urbanos, basada en la proximidad, densidad y diversidad de los comercios, servicios y equipamientos que dan servicio a la población, estableciendo núcleos socio-ambientales sostenibles y eficientes.

La identificación de factores que influyen en la accesibilidad a nivel perceptual y subjetivo, se aborda en investigaciones recientes [3, 4, 9, 10], aportando al entendimiento de dinámicas de movilidad e interacción socioespaciales, a partir de los atributos que definen la calidad, el confort y la vitalidad del entorno urbano. Allí, destaca la influencia positiva de la diversidad de actividades, la presencia de la naturaleza en el espacio urbano, y la funcionalidad de los componentes físicos para la movilidad segura.

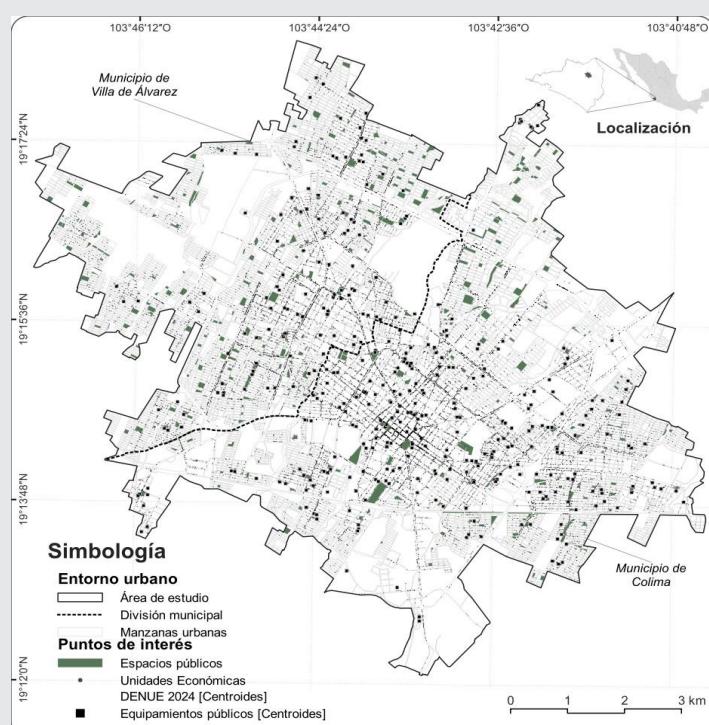
La conectividad espacial del territorio urbano se evalúa en trabajos recientes [10-14], donde la accesibilidad, camina-

bilidad, eficiencia y las preferencias del desplazamiento humano son asociadas con indicadores morfológicos que definen la jerarquía de cada segmento vial en un sistema urbano. En ellos, se asocia el alto desempeño espacial-morfológico de la red vial respecto al uso/frecuencia del espacio urbano, donde se establecen la eficiencia de índices de la conectividad, centralidad y compacidad vial como predictores de la accesibilidad y la integración de los territorios, destacando con ello la importancia de la estructura vial urbana.

Bajo la premisa de la heterogeneidad o desigualdad en accesibilidad urbana, esta investigación tiene por objetivo analizar la distribución espacial de la accesibilidad; ello, considerando la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez como área de estudio, tomando su tejido vial como conjunto de vectorial objetos para el análisis geoestadístico. Se consideró la aplicación de una metodología [4], en la cual se incorporan indicadores sobre: 1) La articulación social; 2) La calidad ambiental y; 3) La eficiencia espacial de la red vial, para la integración del Índice de Accesibilidad del Espacio Vial Urbano [IAEVU], y un factor de ajuste de acuerdo a la distancia al Espacio Público [IAAEVU]. Los resultados permitieron identificar patrones, tipologías y jerarquías del área de estudio con base en su accesibilidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, que alberga 265,770 habitantes en 7013.4ha [14-16]. El análisis se realizó con base en los 16,781 tramos viales como Unidad Básica de Análisis (UBA). La Figura 1 muestra el área de estudio y puntos de interés dentro del entorno urbano.



La Figura 2 ilustra la metodología, indicando sus etapas, datos, procesos y productos.

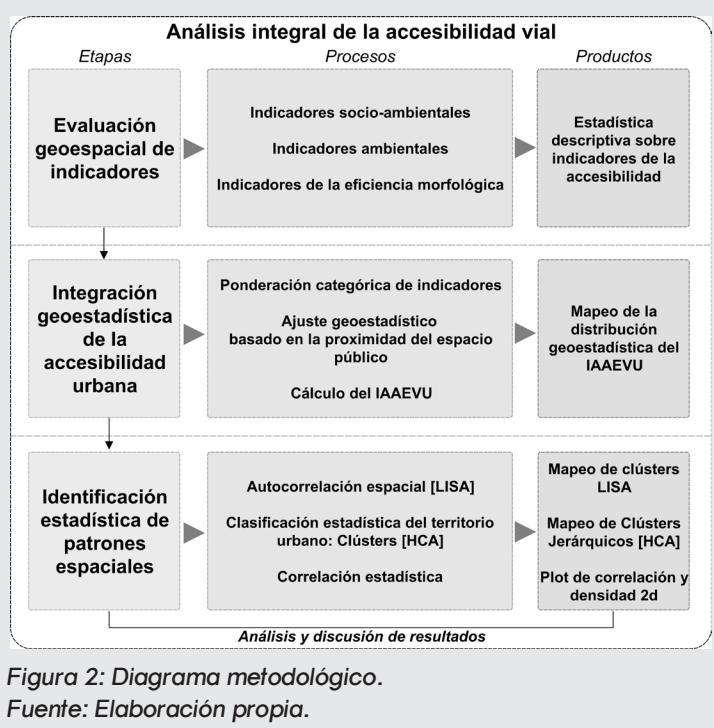


Figura 2: Diagrama metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del índice se integran variables que definen la accesibilidad urbana [4, 6, 14] en tres categorías: a) socio-ambientales; b) calidad ambiental y c) eficiencia espacial-morfológica Tabla 1.

Tabla 1. Variables del índice de accesibilidad vial.

Categoría	Indicador	Fuente
Indicadores socio-ambientales (S)	S.1 Densidad poblacional	CPV INEGI [15]
	S.2 Densidad comercial	DENUE [17]
	S.3 Proximidad	MGN INEGI [16]
Indicadores de la calidad ambiental (A)	A.1 Calidad térmica	Banda 10 USGS [18]
	A.2 Densidad arbórea	Bandas 4 y 5 USGS [18]
	A.3 Pendiente vial promedio	DEM INEGI [19]
Indicadores de la eficiencia morfológica (M)	M 1. Centralidad	Calculado mediante sDNA [20]
	M 2. Intermediación	
	M 3. Conectividad	

Fuente: Elaboración propia con base en [4].

El proceso geoestadístico aplicado para evaluar el desempeño de cada tramo vial se define en la Ecuación 1.

$$DV_i = \sum_{U \in A(v,r)_i} V_x(U) \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

DV_i : Desempeño de la variable V en la UBA i.

$U \in A(v,r)_i$: Unidades (puntos, polígonos, pixeles), dentro del área A, definida por un vector v y radio de influencia r de la UBA i.

$V_x(U)$: Valor de variable V en las unidades U .

Indicadores socio-ambientales

Siendo predictores del potencial de la interacción humana en el espacio urbano, se consideró la densidad poblacional, densidad comercial y la proximidad institucional como variables; ellas, fueron recuperadas del CPV, DENUE y MGN de INEGI [15, 16, 17].

Indicadores de la calidad ambiental

Como indicadores sobre el confort y/o facilidad del desplazamiento humano, fueron incorporadas variables de la calidad térmica, densidad arbórea y pendientes, que definen la habilitación ambiental para la interacción. Sus datos se recuperaron de datos ráster del proyecto Landsat 8-9-L2 [18] y del Modelo de Elevación Digital de INEGI [19]. La Ecuación 2 define la operación para la obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

$$NDVI = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)} \quad \text{Ec. (2)}$$

La ecuación 3 define la operación para el cálculo de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$T_{^{\circ}\text{C}} = ((B10(0.003418)) + 149) - 273.15 \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

B4: Banda 4 Landsat-8-9-L2 (Rojo)

B5: Banda 5 Landsat-8-9-L2 (NIR)

B10: Banda 10 Landsat-8-9-L2 (TIR)

Indicadores de la eficiencia morfológica

Emanadas de la teoría de grafos, con énfasis en el análisis de sistemas vectoriales, las variables de centralidad, intermediación y conectividad son predictores de micro escala sobre el alcance de una red espacial. Para su cálculo, fue utilizado Street Design Network Analysis (sDNA) [20, 21], considerando la totalidad de tramos viales, con una distancia radial de entrada de 600 metros.

La Ecuación 4 define la centralidad:

$$\text{Centralidad}_i = \frac{\sum_{y \in R_z} d_M(x, y) W(y) P(y)}{\sum_{y \in R_z} W(y) P(y)} \quad \text{Ec. (4)}$$

La Ecuación 5 define el cálculo de la intermediación, o la frecuencia en la que un vector es ruta más corta:

$$\text{Intermediación}_i = \sum_{y \in N} \sum_{z \in Z} W(y) W(z) P(z) OD(y, z, x) \quad \text{Ec. (5)}$$

La Ecuación 6 define la conectividad vial.

$$\text{Conectividad}_i(x) = \sum_{y \in R_x} P(y \in z) \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

$d_M(x, y, z)$: Distancia métrica entre dos vectores x, y, z .

R : Radio de cálculo.

P : Nodos dentro del radio efectivo R .

N : Número de vectores en el grafo.

V : Número de nodos en el grafo.

W : Ponderación vectorial.

Integración del Índice de Accesibilidad

El Índice de Accesibilidad Vial del Espacio Urbano (IAEVU), se calculó a partir de la ponderación categórica de las variables, de acuerdo al ajuste descrito la Tabla 2.

Tabla 2. Ajuste categórico; IAEVU

Categoría	Ponderación (f)
Socio-ambiental	1.00
Calidad ambiental	0.70
Eficiencia morfológica	0.45

Fuente. Elaboración propia.

La Ecuación 7 define la obtención del IAEVU.

$$IAEVU_i = \frac{V_a \bar{S}_i + V_a \bar{A}_i + V_a \bar{M}_i}{3} \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:

$AEVU_i$: IAEVU sobre la UBA i.

V_a : Factor de ajuste por categoría.

$\bar{S}_i, \bar{A}_i, \bar{M}_i$: Promedio categórico sobre la UBA i.

Para integrar el Espacio Público (EP) como puntos esenciales de la accesibilidad, se propuso un factor de ajuste ponderado por la distancia, definido en la Ecuación 8.

$$IAAEVU_i = \frac{IAEVU_i}{1 - \left(\frac{\bar{d}_{i,EP}}{\pi} \right)} \quad \text{Ec. (8)}$$

Dónde: $U \in A(v; r)_i$

$IAAEVU_i$: Índice Ajustado de Accesibilidad del Espacio Vial Urbano en la UBA i.

$\bar{d}_{i,EP}$: Distancia normalizada promedio al EP más cercano en la UBA i.

Análisis geoespacial y geoestadístico de resultados

Para el análisis de los resultados, fue necesario integrar el tejido urbano en teselas geométricas que representen la continuidad espacial del territorio urbano. Ello, se realizó mediante la función Polígonos de Voronoi con base en los centroides de cada tramo vial.

Los patrones geoestadísticos sobre el IAAEVU, se identificaron con el análisis LISA de autocorrelación espacial [22] en GeoDa v. 1.22.0.4 [23]; mediante la I Local de Moran, se detectaron clústers espaciales de acuerdo a la tendencia de valores observados: Alto-Alto [A-A], Bajo-Alto/Alto-Bajo [B-A/A-B], Bajo-Bajo [B-B] y Sin Significación [SS], definida en la Ecuación 9.

$$I_i = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} = z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:

I_i : I local de Moran en la UBA i.

w_{ij} : Relación espacial entre las UBA i, j.

z_{ij} : Valores observados en las UBA i, j.

Para la definición del direccionamiento y aglomeración espacial de valores máximos y mínimos [10% mayor y menor del IAAEVU], se utilizó el Elipse de Distribución Direccional (EDE) [24] definido en las Ecuaciones 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4.

$$EDE(\text{centro})_{i(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{Ec. (10.1)}$$

$$EDE(\text{Rotación angular})_i(\tan\theta) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2 w_i - \sum_{i=1}^n y_i^2 w_i) +}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 w_i - \sum_{i=1}^n y_i^2 w_i)^2 + 4(\sum_{i=1}^n x_i y_i w_i)}} \quad \text{Ec. (10.2)}$$

$$EDE(\text{Desv. estándar})_{i(x,y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cos\theta - y_i \sin\theta)^2 w_i}{n \times w_i}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cos\theta - x_i \sin\theta)^2 w_i}{n \times w_i}} \quad \text{Ec. (10.3)}$$

$$EDE(\text{Excentricidad})_i = \frac{c_i}{a_i} \quad \text{Ec. (10.4)}$$

Dónde:

EDE_i = Elipse de Desviación Estándar i.

x_i, y_i = Coordenadas (Centroide) de la UBA i.

w_i = Peso (variable) asignado a la UBA i.

c_i = Distancia focal del EDE i.

a_i = Distancia eje mayor del EDE i.

Finalmente, se definieron tipologías del territorio urbano, con base en la similitud geoestadística entre indicadores del IAAEVU, por medio del proceso de Análisis de Clústers Jerárquicos (HCA), realizado en GeoDa [23].

RESULTADOS

La distribución del IAAEVU se muestra en la Figura 3, registrando patrones heterogéneos en la accesibilidad del área de estudio. Allí, se observa una tendencia a la centralización de los valores máximos, y una difusión irregular y periférica sobre los valores mínimos.

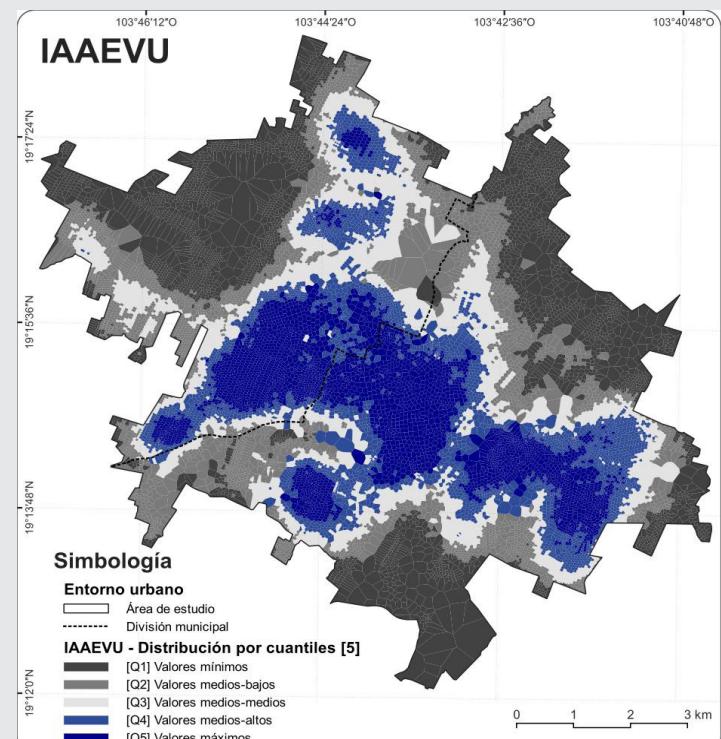


Figura 3: Distribución geoestadística del IAAEVU.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 y la Figura 4 muestran la síntesis estadística de los indicadores de la IAEVU, en donde se registra un rango compacto [0.1-0.4] considerando las 57 UBA aisladas el Espacio Público (parques, jardines, etc.), anómalas en la distribución estadística [<0.10 IAAEVU].

Tabla 3. Variables del índice de accesibilidad vial.

Indicador	Valores observados			
	Prom.	Min.	Max.	
S1	Den. poblacional (hab)	6025.72	0	15692
S2	Densidad comercial (UE)	328.01	0	1787
S3	Proximidad institucional (#)	7.04	0	34
A1	Calidad térmica ($^{\circ}$ C)	41.18	37.89	46.89
A2	Densidad arbórea (NDVI)	0.13	0.08	0.23
A3	Pendiente (m)	44.76	17.25	75.21
M1	Centralidad	376.4	10	519.68
M2	Intermediación	986.25	0.07	8362.44
M3	Conectividad	4.77	0	10
EPD	Distancia al EP (m)	211.34	99.87	1564.74
IA	IAEVU (IA)	0.26	0.1	0.4
IAA	IAAEVU (IAA)	0.27	0.11	0.41

Fuente: Elaboración propia.

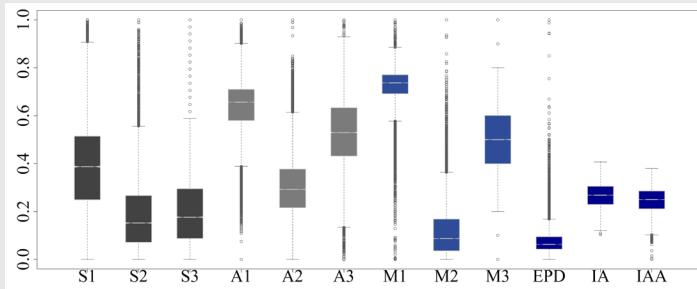


Figura 4: Distribución normalizada de indicadores.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra los resultados del análisis de Autocorrelación Espacial (LISA), derivados del cálculo del IAAEVU, en donde los clústers indican la presencia de núcleos consolidados del territorio urbano. Los EDE [Elipses de Distribución Direccional] sobre los valores máximos y mínimos [$<10\%$, $>90\%$], indican la centralización del IAAEVU, con una asimetría en su tendencia espacial.

La Tabla 4 muestra las coberturas por clúster, donde el 21.97% de la superficie y el 37.64% de los pobladores en el área de estudio se localizan en el clúster Alto-Alto, y, por el contrario, el 35.76% de la superficie y el 14.51% de la población está vulnerada por bajos índices del IAAEVU [Clúster Bajo-Bajo]. El 47.22% de superficie y el 47.83% de los pobladores están dispuestos dentro de zonas transicionales sin significancia estadística [SSE, $p>0.05$], defini-

niendo una desvinculación espacial entre los núcleos de accesibilidad.

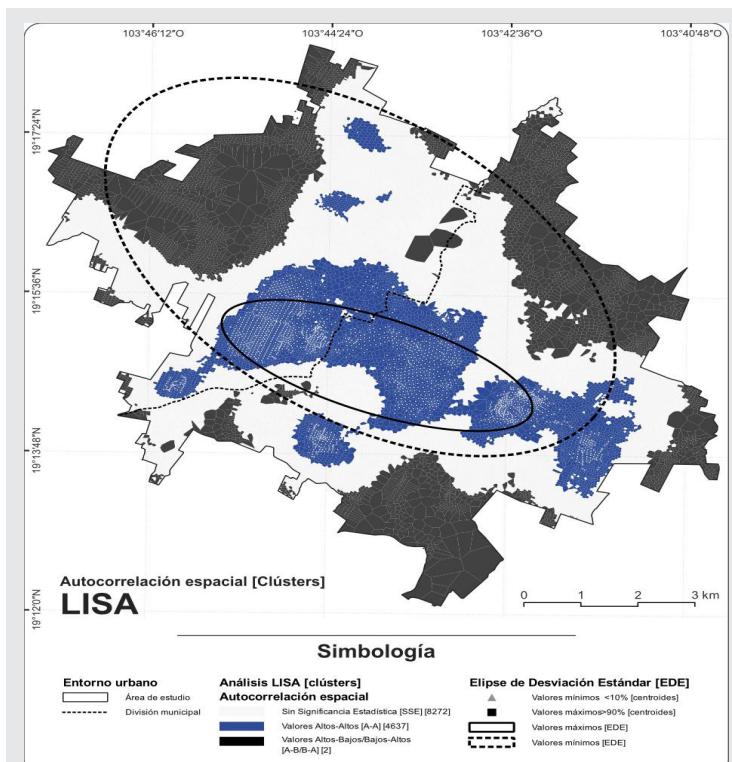


Figura 5: Análisis LISA basada en el IAAEVU.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Síntesis estadística; clústers LISA.

Clúster	Cobertura			IAAEVU
	Tipo	Pol.	Área (ha)	Población (hab.)
Alto-Alto	4637	1541.51	100036	0.31
Bajo-Bajo	3870	2508.15	38576	0.17
Alto-Bajo	1	0.06	33	0.23
Bajo-Alto	1	2.57	4	0.26
SSE	8272	2961.18	127121	0.25

Fuente: Elaboración propia.

Nota: SSE: Sin Significancia Estadística.

Las tipologías urbanas asociadas al IAAEVU, derivaron del Análisis de Clústers Jerárquicos (HCA). Su calibración y ajuste se definió con 6 clústers basados en la similitud geoestadística sobre los indicadores del IAEVU Figura 6.

En ellos, destaca la identificación de un núcleo o «centralidad» en el clúster 1, definido en torno al Zona Centro Histórico del Municipio de Colima, con 39.93 hab/ha y el IAAEVU promedio más alto [0.31]. El clúster 4 define al núcleo urbano consolidado, con el mayor índice de cobertura territorial [29.65%] y poblacional [41.45%], dispuesto en torno al clúster 1 bajo un patrón espacial semi-radial. El clúster 5 define las áreas con el IAAEVU más bajo, teniendo 17.47 hab/ha Tabla 5.

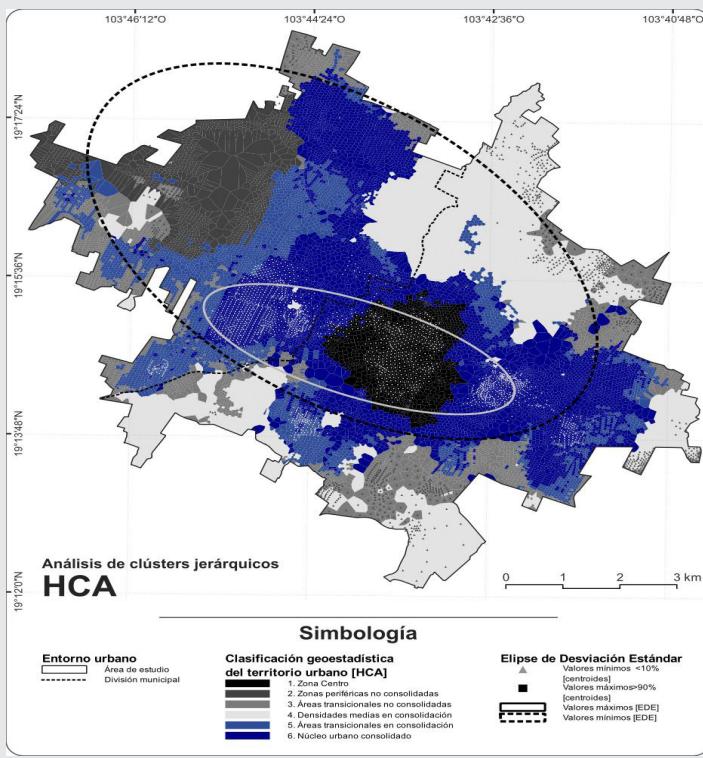


Figura 6: Tipologías urbanas basadas en el IAAEVU.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Síntesis estadística; clústeres (HCA).

Clúster		Cobertura		IAAEVU
(#)	Polígonos	Área (ha)	Población (hab.)	
1	1030	452.91	18088	0.31
2	2475	1025.35	32742	0.2
3	2643	1743.87	28562	0.2
4	5940	2079.75	110166	0.28
5	1170	679.68	11875	0.16
6	3523	1031.91	64337	0.26

Fuente: Elaboración propia.

La identificación de correlaciones específicas entre indicadores del IAAEVU, se realizó una matriz de correlación [Pearson], Figura 7.

Entre el conjunto de variables destaca la complementariedad de la densidad comercial y proximidad institucional [S2:S3], con Coeficientes de Correlación [CC] de 0.85, y una significancia $p<0.005$. Sobre la pertinencia de las variables morfológicas, es significante la relación entre la centralidad e intermediación como predictores del nivel de articulación socio-ambiental, oscilando entre CC positivos de 0.17-0.38, $p<0.005$, donde se destaca su efectividad para detectar núcleos de interacción en torno al espacio público, al tener un CC negativo respecto a la distancia promedio sobre cada UGB. [EPD; CC: -0.30].

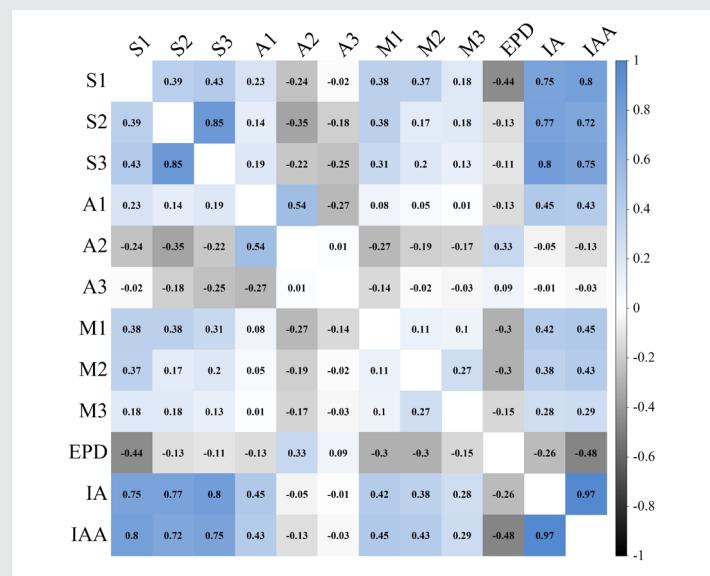


Figura 7: Matriz de correlación factorial (Pearson).

Fuente: Elaboración propia.

El factor de ajuste geoestadístico para el cálculo de la IAAEVU, representa el grado de vinculación entre el tejido vial urbano y los Espacios Públicos del área de estudio, que registra una correlación negativa [CC: -0.48, $p<0.005$] respecto al índice. En la Figura 8 se muestra un mapeo de densidad 2d, donde los umbrales de distanciamiento [<200 ; $200-400$; >400 metros], demuestran la mayor influencia del Espacio Público sobre la IAAEVU dentro del rango de 0-200 metros. Lo anterior influye sobre las 4585 UGB que sobrepasan el tercer cuartil del IAAEVU [3Q: 0.282], con una EPD promedio de 185.18 metros, y una cobertura territorial de 1534.94ha (21.88% del área de estudio), indicativo de la efectividad del factor propuesto para definir núcleos de interacción.

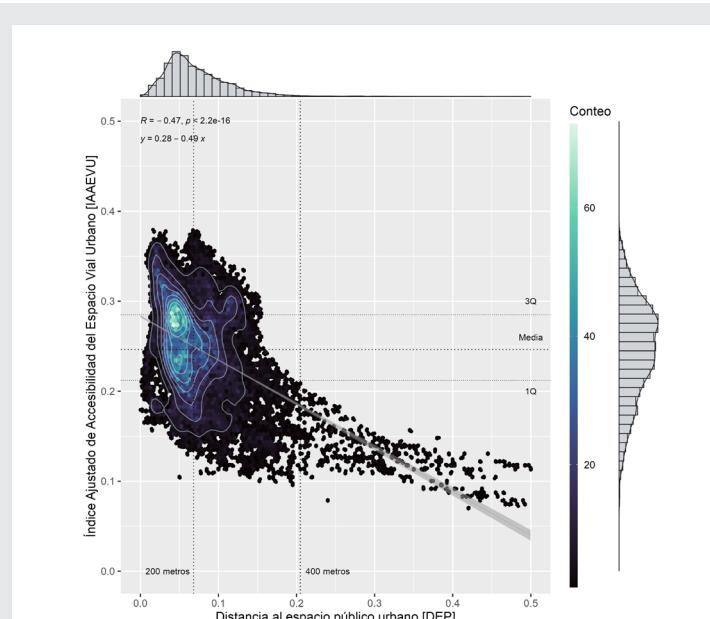


Figura 8: Mapeo de densidad 2d; influencia del EP.

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de la metodología desarrollada indica que el 37.64% de la población reside en núcleos con altos índices de accesibilidad. Al contrastar los resultados con estudios previos [5, 8], donde los sectores consolidados oscilan e entre el 70-90%, la ZCCVA destaca debido a las deficiencias sistémicas en la integración de su territorio. La clasificación por clústers de las seis tipologías urbanas es indicativa de los procesos de fragmentación en la producción del suelo urbano, cuyos patrones permiten la identificación de áreas aisladas o marginadas, representativas de la desigualdad espacial.

En ese sentido, el IAAEVU permite establecer deficiencias sistémicas en el desarrollo urbano que estén asociadas al aislamiento funcional de zonas transicionales, periféricas y de baja densificación, que disminuyan la interacción e integración socioespacial del territorio [4,14].

La incorporación ponderada de indicadores de carácter socioambiental, ambiental y espacial para el cálculo del IAAEVU [3, 5, 9, 11-12] es contribuye al entendimiento de la accesibilidad como un fenómeno espacial con el cual puede segmentarse el territorio urbano de acuerdo a su funcionalidad estructural [14, 25, 26].

Coinciendo con la literatura, la densidad de población es el mayor predictor geoestadístico de la accesibilidad [4, 6, 8]. La centralidad y la intermediación son asimismo significantes [3, 11, 12], vinculadas con la disponibilidad de los espacios públicos urbanos [4, 7, 14].

Futuras investigaciones pueden comparar el desempeño de ciudades de diversas escalas y localizaciones, para identificar patrones de la accesibilidad, y sus grados de integración.

CONCLUSIONES

La accesibilidad en las ciudades es un indicador significante para definir el nivel local vitalidad, salubridad e integración del territorio urbano; en ese contexto, los resultados de la presente investigación hacen contribuciones sobre el conocimiento de factores que inciden en la accesibilidad, proponiendo criterios de procesamiento geoestadístico para integrar y ponderar el subsistema de espacios públicos con la red vial urbana. En ese sentido, existe un potencial extenso para su aplicabilidad, en donde ha sido demostrada su eficacia para la definición de jerarquías, tipologías y patrones espaciales relativos a la accesibilidad urbana.

El enfoque metodológico abona al estudio de la eficiencia territorial-urbana, que posibilita la identificación de núcleos consolidados dentro de la ciudad, así como de áreas vulneradas; asimismo, se proveen parámetros rescatables para la planificación de ciudades compactas, integradas y sostenibles frente a los desafíos latentes que exigen la eficiencia de recursos y una mejor generalizadas en la calidad de vida de una ascendente población urbana global.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ONU-Hábitat, "Nueva Agenda Urbana Ilustrada," 2020. <https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/nueva-agenda-urbana-ilustrada.pdf> (consultado Sep. 04, 2025).
- [2] SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) and CONAPO (Consejo Nacional de Población), "Sistema Urbano Nacional 2020-2," 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/951560/SUN_2020_Parte2.pdf (consultado Sep. 04, 2025).
- [3] C. Yu, X. Wang, Z. Zheng, and S. Lau, "How Do Urban Environments Impact Walkability? An Analysis Using Multi-Source Data of Beijing," *Land*, vol. 13, no. 12, p. 2101, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/land13122101>.
- [4] W. G. Hansen, "How Accessibility Shapes Land Use," *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 25, no. 2, pp. 73-76, May 1959, doi: <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>.
- [5] Alexandros Sdoukopoulos, E. Papadopoulos, E. Verani, and I. Politis, "Putting theory into practice: A novel methodological framework for assessing cities' compliance with the 15-min city concept," *Journal of Transport Geography*, vol. 114, no. 1, pp. 103771-103771, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103771>.
- [6] F. Fonseca et al., "Built environment attributes and their influence on walkability," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 16, no. 7, pp. 1-40, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/15568318.2021.1914793>.
- [7] Khaled Alawadi, R. Anabtawi, and Ghalya Alshehhi, "The Minute City: between theory and practicality in suburban landscapes," *Sustainability Science Practice and Policy*, vol. 21, no. 1, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2444007>.
- [8] J. Wang, M.-P. Kwan, Gezhi Xiu, and F. Deng, "A robust method for evaluating the potentials of 15-minute cities: Implications for sustainable urban futures," *Geography and sustainability*, vol. 5, no. 4, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.07.004>.
- [9] S. Jin and E. J. Kim, "Correlation of the Walk Score and Environmental Perceptions with Perceived Neighborhood Walkability: The Quantile Regression Model Approach," *Sustainability*, vol. 16, no. 16, p. 7074, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16167074>.

- [10] L. Mitropoulos, C. Karolemeas, S. Tsigdinos, A. Vassi, and E. Bakogiannis, "A composite index for assessing accessibility in urban areas: A case study in Central Athens, Greece," *Journal of Transport Geography*, vol. 108, p. 103566, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103566>.
- [11] P. Schön, E. Heinen, and B. Manum, "Associations of Street Network and Urban Form with Walking Frequencies," *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 25, no. 1, pp. 107–132, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.59490/ejtr.2025.25.1.7234>.
- [12] P. Schön, E. Heinen, Vegar Rangul, E. R. Sund, and Bendik Manum, "The impact of street network connectivity on active school travel: Norway's HUNT study," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 51, no. 9, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1177/23998083241235978>.
- [13] D. M. Pearce, R. Matsunaka, and T. Oba, "Comparing accessibility and connectivity metrics derived from dedicated pedestrian networks and street networks in the context of Asian cities," *Asian Transport Studies*, vol. 7, p. 100036, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2021.100036>.
- [14] I. Fariñas-Moreno, P. Chung-Alonso, A. Cuevas-Muñiz, M. S. del R. Covarrubias-Ruesga, and J. A. Gutiérrez-Valencia, "Caracterización territorial basada en la calidad del espacio público de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, México," *Investigaciones Geográficas*, no. 117, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.14350/rig.61015>.
- [15] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Censo de Población y Vivienda 2020," *Datos Abiertos*, 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020> (consultado Sep. 04, 2025).
- [16] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Marco Geoestadístico Nacional [diciembre_2023]," Dec. 2023. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314> (consultado Sep. 04, 2025).
- [17] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Relieve continental. Modelo digital de elevación," 2019. <https://www.inegi.org.mx/temas/reieve/continental> (consultado Sep. 04, 2025).
- [18] USGS (United States Geological Survey), "Landsat 8-9 C2 L2. 20240304," *EarthExplorer*, Mar. 04, 2024. https://earthexplorer.usgs.gov/download/options/landsat_ot_c2_l2/LC80290472024064LGN00/ (consultado Sep. 04, 2025).
- [19] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Colima.," Jan. 2024. https://www.inegi.org.mx/contenidos/masiva/denue/denue_06_shp.zip (consultado Sep. 04, 2025).
- [20] C. H. V. Cooper and A. J. F. Chiaradia, "sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line & Python," *SoftwareX*, vol. 12, p. 100525, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525>.
- [21] C. Cooper, "Spatial Design Network Analysis (sDNA) Open version 4.2 Manual," 2021. https://sdna-open.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/ (consultado Sep. 04, 2025).
- [22] L. Anselin, "Local Indicators of Spatial Association-LISA," *Geographical Analysis*, vol. 27, no. 2, pp. 93–115, Sep. 1995, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>.
- [23] L. Anselin, I. Syabri, and Y. Kho, "GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis," *Geographical Analysis*, vol. 38, no. 1, pp. 5–22, Jan. 2006, doi: <https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x>.
- [24] R. S. Yuill, "The Standard Deviational Ellipse; An Updated Tool for Spatial Description," *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, vol. 53, no. 1, pp. 28–39, Apr. 1971, doi: <https://doi.org/10.1080/04353684.1971.11879353>.
- [25] C. Wu, J. Wang, M. Wang, and M.-J. Kraak, "Machine learning-based characterisation of urban morphology with the street pattern," *Computers, environment and urban systems*, vol. 109, no. 4, pp. 102078–102078, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102078>.
- [26] M. Berghauer Pont, G. Stavroulaki, and L. Marcus, "Development of urban types based on network centrality, built density and their impact on pedestrian movement," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 46, no. 8, pp. 1549–1564, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/2399808319852632>.

