

Hernández, V., Sánchez Florez, E., Iracheta Lara, I. Z. (2026). Radiancia nocturna como indicador urbano en Ciudad Juárez, México: un análisis espacial con imágenes VIIRS y Landsat. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (Artículos), 37, 87-108. <https://dx.doi.org/10.21138/GF.934>

RADIANCIA NOCTURNA COMO INDICADOR URBANO EN CIUDAD JUÁREZ, MÉXICO: UN ANÁLISIS ESPACIAL CON IMÁGENES VIIRS Y LANDSAT

^aVladimir Hernández , ^bErick Sánchez Florez ,
^cIreyli Zuluamy Iracheta Lara 

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Juárez, Chihuahua, México.

^avladimir.hernandez@uacj.mx, ^besanchez@uacj.mx, ^cireyli.iracheta@gmail.com

RESUMEN

La radiancia nocturna captada por el sensor VIIRS-DNB constituye un indicador útil para examinar desigualdades urbanas y configuraciones territoriales diferenciadas. Este trabajo analiza su relación con atributos intraurbanos de Ciudad Juárez —densidad de población, índice socioeconómico, vialidades principales, industria, comercio y servicios, NDVI y NDBI— mediante la integración de imágenes VIIRS-DNB y Landsat 8 con información censal y económica a escala de AGEB urbana. Se estimó primero un modelo global de regresión lineal múltiple y, posteriormente, una regresión ponderada geográficamente (GWR) para identificar variaciones locales en la intensidad y el signo de las asociaciones. Los resultados muestran que la radiancia nocturna aumentó entre 2013 y 2023 de forma predominantemente positiva, aunque con una distribución territorial desigual. El modelo global alcanzó un $R^2 = 0.600$, mientras que el GWR mejoró sustantivamente el ajuste ($R^2 = 0.940$; AIC = 4262.48), evidenciando que las relaciones entre radiancia nocturna y predictores no son espacialmente homogéneas. Los hallazgos confirman el valor de la radiancia nocturna como herramienta de diagnóstico intraurbano y como apoyo para una lectura territorialmente diferenciada de la ciudad.

Palabras clave: radiancia nocturna; desigualdades urbanas; regresión ponderada geográficamente.

NIGHTTIME RADIANCE AS AN URBAN INDICATOR IN CIUDAD JUÁREZ, MEXICO: A SPATIAL ANALYSIS USING VIIRS AND LANDSAT IMAGERY

ABSTRACT

Nighttime radiance captured by the VIIRS-DNB sensor provides a useful lens for examining urban inequality and territorially differentiated spatial configurations. This article analyzes its relationship with intra-urban attributes in Ciudad Juárez—population density, socioeconomic conditions, major roadways, industrial activity, commerce and services, NDVI, and NDBI—by integrating VIIRS-DNB and Landsat 8 imagery with census and economic data at the urban AGEB level. A global multiple linear regression model was first estimated as a baseline, followed by a geographically weighted regression (GWR) model to identify local variations in the strength and direction of these associations. The results show that nighttime radiance increased between 2013 and

2023 in a predominantly positive but territorially uneven manner. The global model achieved an R^2 of 0.600, whereas the GWR substantially improved model fit ($R^2 = 0.940$; $AIC = 4262.48$), indicating that the relationships between nighttime radiance and its predictors are not spatially homogeneous. These findings confirm the value of nighttime radiance as an intra-urban diagnostic tool and as a basis for a territorially differentiated reading of the city.

Keywords: nighttime radiance; urban inequality; geographically weighted regression.

1 Introducción

Para estudiar los patrones de radiancia nocturna captada por VIIRS en relación con la configuración espacial y las disparidades urbanas, Ciudad Juárez representa un caso especialmente revelador. Esta condición se refuerza al observar el desequilibrio histórico que muestran los datos censales: entre 1940 y 2020, la población se multiplicó por 30, mientras que la extensión urbanizada lo hizo por 60 (INEGI 1943, 2020a). A lo largo de este proceso, las densidades poblacionales descendieron de 150 a 39 hab/ha entre 1950 y 2010 (Maycotte *et al.* 2010), lo que dio lugar a una mancha urbana desarticulada y a marcadas disparidades en la oferta de servicios. En ese cambio confluyeron distintos procesos, entre ellos la especulación del suelo en áreas periféricas, las políticas de vivienda orientadas a la expansión horizontal y la escasa articulación entre crecimiento industrial y planificación urbana. Fuentes y Hernández (2013, 2015) señalan que la infraestructura en Juárez no avanzó al ritmo de la expansión territorial, circunstancia que vuelve especialmente pertinente este caso de estudio.

La urbanización extensiva desembocó en un espacio urbano profundamente desigual, donde el crecimiento poblacional tendió a concentrarse en periferias con menor valor del suelo. En términos generales, esas áreas se consolidaron con infraestructura insuficiente; en varios sectores ello incluyó redes incompletas y déficits de alumbrado público, condiciones que contribuyeron a intensificar distintas formas de vulnerabilidad urbana. Aun así, durante la última década Ciudad Juárez ha mostrado señales de transformación: por primera vez en más de sesenta años disminuyó la tasa de crecimiento del área urbana y la densidad comenzó a recuperarse, en parte debido a procesos de densificación sobre espacios interiores previamente subutilizados. El tejido actual combina áreas ya consolidadas con vacíos intraurbanos, zonas en transformación y periferias aún en expansión. Todo ello incrementa su valor como laboratorio urbano para examinar cómo distintas formas de urbanización producen distribuciones desiguales de radiancia nocturna. La pertinencia urbana del problema aumenta si se considera que las políticas locales de iluminación siguen sin integrarse plenamente a una estrategia de desarrollo urbano sostenible (IMIP 2016).

La noción de radiancia nocturna ha experimentado una transformación importante en la literatura. En una primera etapa se le abordó sobre todo como manifestación de contaminación lumínica y como alteración de la oscuridad natural (Falchi *et al.* 2011). Con el tiempo, sin embargo, comenzó a entenderse también como una señal sintética de dinámicas urbanas complejas y de procesos espaciales socialmente producidos (Elvidge *et al.* 2021, Levin *et al.* 2020). Esta perspectiva adquiere particular relevancia en espacios como Ciudad Juárez, donde se ha documentado que la radiancia nocturna afecta ritmos circadianos y condiciones ambientales (Cheng *et al.* 2021, Chepesiuk 2009, Lunn *et al.* 2017), a la vez que hace visibles procesos históricos ligados a la urbanización desigual y a la diferenciación espacial. Los primeros estudios se concentraron en los efectos de la luz artificial sobre ecosistemas, como documentaron Rich y Longcore (2006) para distintos componentes de la flora y la fauna. Más adelante, la discusión se desplazó hacia las ciencias urbanas. En ese marco, la radiancia nocturna observada por satélite comenzó a leerse como una expresión del espacio urbano socialmente configurado. Esta interpretación se apoya también en evidencia internacional: Small y Elvidge (2011) mostraron que la intensidad de la radiancia en China se relaciona con procesos de urbanización acelerada, mientras que Alahmadi *et al.* (2021) documentaron en Arabia Saudita vínculos entre desigualdades lumínicas y divisiones socioeconómicas persistentes. En una ciudad fronteriza como Ciudad Juárez, donde 59.9 % de la población reporta deficiencias en la iluminación pública (Encuesta Nacional de Seguridad Pública Urbana, INEGI 2025), esta discusión adquiere un alcance particularmente concreto, pues se entrelaza con percepciones de inseguridad y experiencias de exclusión urbana.

La teledetección ofrece herramientas fundamentales para examinar estas dinámicas. El índice urbano (UI), el índice de construcción de diferencia normalizada (NDBI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenidos a partir de imágenes Landsat 8, permiten captar dimensiones de la cobertura terrestre y ponerlas en relación con la radiancia nocturna detectada por VIIRS (Huang *et al.* 2021, Liu *et al.* 2022, Kebede *et al.* 2022). Para analizar esas relaciones se requieren, además, métodos sensibles a la heterogeneidad espacial. En este sentido, los modelos globales tienden a promediar vínculos que, en realidad, pueden variar de manera importante entre distintos sectores de la ciudad (Brunsdon *et al.* 1998). Por ello, la Regresión Ponderada Geográficamente (GWR) resulta pertinente, ya que permite estimar coeficientes locales y reconocer cómo cambian espacialmente la intensidad y el sentido de las asociaciones entre la radiancia nocturna y sus predictores (Fotheringham *et al.* 2002, Gollini *et al.* 2015, Lu *et al.* 2014).

El objetivo principal de esta investigación es analizar los patrones espaciales de la radiancia nocturna captada por VIIRS en Ciudad Juárez mediante un modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR), articulando imágenes Landsat 8 y VIIRS con indicadores biofísicos de cobertura del suelo e información urbana a escala intraurbana. De este propósito general se derivan tres objetivos específicos: a) caracterizar la distribución de la radiancia nocturna en Ciudad Juárez entre 2013 y 2023 con imágenes VIIRS; b) derivar e integrar indicadores biofísicos de cobertura del suelo obtenidos de Landsat 8, particularmente NDVI y NDBI, junto con variables urbanas relevantes para el análisis espacial; y c) examinar la relación espacial entre los indicadores de cobertura del suelo, las variables urbanas relevantes y la radiancia nocturna captada por VIIRS, con el fin de identificar patrones de desigualdad espacial en Ciudad Juárez. A partir de ello, la investigación busca aportar evidencia empírica sobre la distribución desigual de la radiancia nocturna en Ciudad Juárez y, al mismo tiempo, construir una referencia metodológica que articule imágenes satelitales y análisis espacial intraurbano. La intención es delimitar con claridad el problema de investigación, reconocer lo que ya se sabe sobre radiancia nocturna en contextos urbanos y señalar lo que todavía permanece poco explorado en ciudades fronterizas, incorporando para ello indicadores biofísicos y una estrategia estadística capaz de captar variaciones espaciales localizadas.

2. Estrategia de investigación

El diseño del estudio se estableció mediante un análisis temporal de la radiancia nocturna con un modelo explicativo de corte transversal. La evolución de la radiancia nocturna se examinó en una serie temporal de imágenes VIIRS-DNB correspondientes al período 2013–2023, lo que permitió identificar tendencias espaciales de la huella lumínica a lo largo del tiempo. Sin embargo, el análisis se desarrolló bajo un enfoque transversal, ya que las variables sociodemográficas y económicas utilizadas como predictores corresponden al corte censal más reciente disponible (Censo de Población y Vivienda 2020 y DENU 2020). En consecuencia, el modelo GWR se estimó utilizando una representación agregada de la radiancia nocturna del periodo de estudio para analizar su relación espacial con las características socioeconómicas y biofísicas del entorno urbano inmediato.

2.1 Caso de estudio

Ciudad Juárez ha experimentado un crecimiento urbano caracterizado por una ampliación rápida y fragmentada de su territorio, con densidades en declive, áreas periféricas que cuentan con infraestructura insuficiente y una notoria desigualdad a la hora de ofrecer servicios urbanos como el alumbrado público. La combinación de estas circunstancias, junto con su ubicación fronteriza y la envergadura de sus procesos urbanísticos moldeados por una intensa dinámica industrial, hacen que Ciudad Juárez sea un caso de estudio ideal para examinar la distribución espacial de la iluminación artificial nocturna y sus conexiones con elementos urbanos y biofísicos.

Situada en el extremo norte de México, esta ciudad fronteriza tiene una población de 1.5 millones de personas (INEGI 2020a) y constituye junto con El Paso, Texas, una conurbación binacional en la que los desplazamientos económicos y migratorios han transformado el espacio urbano. La industria maquiladora, principal actividad económica de la ciudad, ha evolucionado desde la década de 1960 (Carrillo Pérez 2024) cambiando sus cimientos económicos y originando un modelo de crecimiento

específico que atrajo a una gran cantidad de migrantes internos mientras su estructura urbana crecía desmesuradamente (Figura 1).

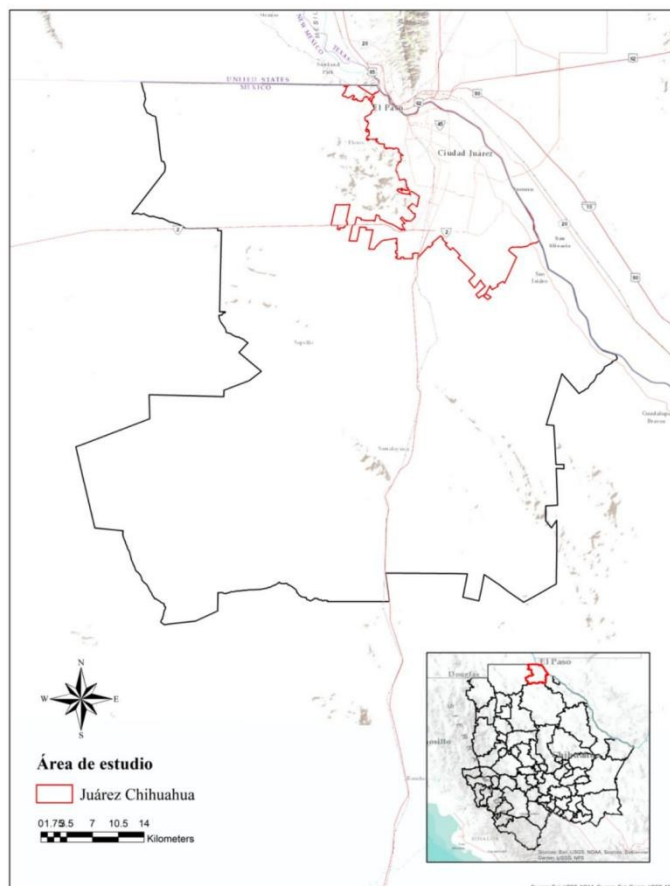


Figura 1. Localización del área de estudio

Fuente: elaboración propia con información de INEGI, 2020a

2.2 Los datos

El análisis combinó fuentes de acceso libre provenientes de censos, registros económicos e imágenes satelitales. Para las variables sociodemográficas se utilizó el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI 2020a), del cual se derivaron indicadores de densidad poblacional y habitacional por hectárea. La información económica provino del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) 2020 (INEGI 2020b), que permitió identificar la localización de establecimientos pertenecientes a los sectores industrial, comercial y de servicios. Las variables sociodemográficas y económicas se agregaron a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB) urbana, definida como la unidad espacial mínima de análisis. Esta escala hizo posible articular información ráster derivada de sensores remotos con datos vectoriales de origen censal y económico.

Para el análisis de la radiancia nocturna, se utilizaron 132 imágenes mensuales de la colección NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSCFG, correspondientes al sensor VIIRS-DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band) del satélite Suomi NPP, con una resolución espacial aproximada de 450 m. La principal ventaja de este insumo radica en que constituye una serie temporal continua y homogénea, adecuada para construir tanto resúmenes multianuales como contrastes temporales dentro del periodo de estudio (Elvidge *et al.* 2017, 2021).

Para la caracterización de la cobertura del suelo, se emplearon 243 escenas de la colección LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 en Google Earth Engine, correspondientes a Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2, Tier 1, filtradas para el periodo 2013–2023 y el área de estudio de Ciudad Juárez. A partir de este conjunto de imágenes, con una resolución espacial de 30 m, se calcularon los índices NDVI,

NDBI y UI, y posteriormente se generó una composición mediana para cada uno (Google Earth Engine, 2024).

El NDVI se utilizó como indicador de vegetación, al estimar la densidad y vigor de la cobertura vegetal con base en la relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo (Huang *et al.* 2021; Liu *et al.* 2022). El NDBI se empleó para resaltar superficies construidas a partir de la diferencia normalizada entre el infrarrojo de onda corta y el infrarrojo cercano (Liu *et al.* 2022). Por su parte, el UI se calculó a partir de bandas del infrarrojo cercano y de onda corta, con el fin de destacar áreas urbanizadas y materiales artificiales (Kawamura *et al.* 1996, Kebede, 2022).

2.3 Procesos y técnicas de análisis

El estudio se estructuró a partir de dos planos analíticos complementarios: un análisis temporal de la radiancia nocturna y un modelo explicativo de corte transversal. La evolución de la radiancia nocturna se examinó mediante una serie temporal de imágenes VIIRS-DNB correspondientes al periodo 2013–2023. El componente explicativo, en cambio, se desarrolló bajo un enfoque transversal, ya que las variables sociodemográficas y económicas utilizadas como predictores corresponden al corte censal más reciente disponible (Censo de Población y Vivienda 2020 y DENU 2020) (INEGI, 2020a, 2020b). En consecuencia, el modelo GWR se estimó utilizando el promedio de radiancia nocturna del periodo 2013–2023 como variable dependiente, con el fin de analizar su relación espacial con las características socioeconómicas y biofísicas del entorno urbano inmediato reportadas en el corte temporal del 2020.

2.3.1 Procesamiento de productos satelitales

Las imágenes VIIRS-DNB fueron depuradas previamente al análisis. Para ello se emplearon los filtros de calidad disponibles en Google Earth Engine, con el fin de excluir valores afectados por nubosidad y otras fuentes de ruido. Posteriormente, las observaciones mensuales se promediaron para obtener valores anuales, lo que permitió atenuar variaciones episódicas y disponer de una representación más estable de la intensidad lumínica. Finalmente, las composiciones anuales se integraron en una superficie promedio correspondiente al periodo 2013–2023, utilizada como base del análisis espacial (Elvidge *et al.* 2017, 2021).

Las escenas Landsat 8 también fueron preparadas previamente al análisis. A partir del conjunto filtrado para el periodo 2013–2023 y el área de estudio, se calcularon los índices NDVI, NDBI y UI. Para cada uno se generó una composición mediana, con el fin de reducir la influencia de valores atípicos y de variaciones puntuales entre escenas, obteniendo así superficies más estables para su integración al análisis espacial (Huang *et al.* 2021, Liu *et al.* 2022, Kebede *et al.* 2022). Todos los productos fueron procesados en Google Earth Engine y exportados en formato GeoTIFF para su incorporación a un sistema de información geográfica en QGIS.

2.3.2 Integración espacial de variables económicas.

En una segunda etapa se incorporaron las variables económicas a partir de los datos georreferenciados del DENU (INEGI, 2020b). Con esta información se estimaron superficies continuas de densidad para establecimientos industriales, comerciales y de servicios mediante la estimación de densidad de kernel (KDE), utilizando una función kernel cuártica. Posteriormente, esas superficies se agregaron mediante estadísticas zonales a nivel de AGEB urbana, considerando el valor promedio. Esto permitió armonizar los indicadores espectrales y las variables sociodemográficas en una misma escala de análisis. El resultado fue una base de datos multivariada georreferenciada que integró información censal, económica y satelital referida a una misma unidad de agregación espacial, el AGEB, como insumo para el análisis estadístico.

2.3.3 Análisis estadístico

Antes de estimar el modelo GWR, se realizó una revisión previa de los predictores mediante una matriz de correlación de Pearson y el cálculo del factor de inflación de la varianza (VIF), con el fin de identificar posibles problemas de redundancia y colinealidad. Esta evaluación permitió depurar la especificación y conservar un conjunto final de variables con niveles aceptables de independencia estadística. La evaluación mostró niveles elevados de multicolinealidad en la especificación inicial, particularmente en el bloque conformado por NDVI, NDBI y UI. En consecuencia, se ajustó la selección de variables y se excluyó el índice urbano (UI), conservando una especificación final con niveles aceptables de independencia estadística entre predictores. Tras este ajuste, los valores de VIF se ubicaron entre 1.13 y 1.92, lo que permitió sostener una configuración más parsimoniosa e interpretable del modelo (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de correlación entre predictores y factor de inflación de la varianza (VIF) del modelo final

Variable	Densidad de población	Industria	Comercio y servicios	Vialidades principales	Índice socioeconómico	NDVI	NDBI	VIF
Densidad de población	1.00							1.16
Industria	0.12	1.00						1.92
Comercio y servicios	-0.07	0.44	1.00					1.42
Vialidades principales	-0.02	0.25	0.15	1.00				1.13
Índice socioeconómico	0.19	0.22	0.11	0.11	1.00			1.32
NDVI	-0.25	-0.62	-0.39	-0.21	-0.33	1.000		1.89
NDBI	0.10	0.15	-0.12	0.00	-0.29	0.006	1.00	1.23

Nota: se presenta el triángulo inferior de la matriz de correlación de Pearson

Fuente: elaboración propia

Con el propósito de examinar la variación espacial en la relación entre la radiancia nocturna y un conjunto de atributos urbanos, se empleó un modelo de Regresión Ponderada Geográficamente (*Geographically Weighted Regression*, GWR). Esta técnica permite estimar coeficientes locales para cada unidad espacial, de modo que la asociación entre la variable dependiente y los predictores pueda variar según la localización. A diferencia de la regresión lineal global, que calcula un único coeficiente promedio para todo el espacio de estudio, GWR parte del supuesto de que las relaciones entre variables pueden ser espacialmente no estacionarias, es decir, que su intensidad e incluso su signo pueden modificarse entre distintas partes de la ciudad (Fotheringham *et al.* 2002, Gollini *et al.* 2015, Lu *et al.* 2014).

En términos sustantivos, esta elección metodológica responde a que la radiancia nocturna observada en una ciudad fronteriza como Ciudad Juárez no necesariamente se relaciona de la misma forma con la densidad de población, las condiciones socioeconómicas, la infraestructura vial, la cobertura vegetal o la concentración de actividades económicas en todo el espacio urbano. Frente a una especificación global, el GWR permite reconocer esas diferencias urbanas y estimar coeficientes locales que expresan cómo cambia la asociación entre la radiancia nocturna y cada predictor según la posición espacial de las unidades analizadas (da Silva Fotheringham 2016, Fotheringham *et al.* 2002).

La formulación general del modelo puede expresarse como:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i)x_{ki} + \varepsilon_i$$

donde y_i representa la variable dependiente en la observación i ; $\beta_0(u_i, v_i)$ es el intercepto local; $\beta_k(u_i, v_i)$ corresponde al coeficiente local de la variable explicativa k en la localización definida por las coordenadas u_i y v_i ; x_{ki} es el valor de la variable explicativa k en esa misma observación; y ε_i es el término de error. En este estudio, la localización de cada observación se definió a partir del centroide de

las AGEB urbanas. El modelo se calibró mediante un kernel espacial bicuadrático (*bisquare*) y un ancho de banda adaptativo, lo que permitió ponderar con mayor intensidad las observaciones vecinas más próximas y reducir gradualmente la influencia de las más distantes (Fotheringham *et al.* 2002, Gollini *et al.* 2015).

Como referencia analítica previa al GWR, se estimó primero un modelo global de regresión lineal múltiple con la radiancia nocturna media como variable dependiente. Esta especificación permitió identificar la dirección general de las asociaciones entre la variable dependiente y los predictores seleccionados, así como establecer una base comparativa para evaluar posteriormente el aporte del modelo local. La variable dependiente en el modelo GRW fue la radiancia nocturna media, expresada en $nW/m^2/sr$ para cada AGEB urbana. Como variables explicativas se incluyeron densidad de población, índice socioeconómico, longitud de vialidades principales, densidad de kernel de establecimientos industriales, densidad de kernel de establecimientos de comercio y servicios, NDVI y NDBI. Estas variables fueron seleccionadas porque permiten aproximarse a distintas dimensiones del espacio urbano: concentración residencial, estructura socioeconómica, accesibilidad e infraestructura vial, localización de actividades económicas, cobertura vegetal y entorno construido.

La estimación del modelo se realizó en R 4.1.0 (R Core Team 2021), empleando librerías especializadas para manejo de datos espaciales, modelación local y análisis de dependencia espacial, entre ellas *sf* (Pebesma 2018, Pebesma Bivand 2023), *dplyr* (Wickham *et al.* 2023), *GWmodel* (Gollini *et al.* 2015, Lu *et al.* 2014), *spdep* (Bivand, 2022, Bivand Wong, 2018) y *sp* (Bivand *et al.* 2013). El procesamiento satelital se desarrolló en Google Earth Engine, mientras que la integración espacial de variables y la elaboración cartográfica se realizaron en QGIS. Esta combinación de entornos permitió articular el tratamiento de imágenes, la construcción de indicadores y la estimación del modelo dentro de un flujo de trabajo documentado.

Los resultados del GWR se interpretaron a partir de la distribución de los coeficientes locales estimados para cada variable y de su representación cartográfica. En términos analíticos, el interés principal radicó en identificar cómo cambia espacialmente la relación entre la radiancia nocturna y los predictores considerados. De este modo, el modelo permitió reconocer variaciones territoriales que quedarían atenuadas en una lectura exclusivamente global.

3. Resultados

3.1 Distribución espacial y evolución de la radiancia nocturna

La radiancia nocturna en Ciudad Juárez, entre 2013 y 2023, presenta diferencias espaciales notables y persistentes (Figura 2). En el área urbana, la intensidad media varió entre 1.06 y 150.31 $nW/m^2/sr$, con un promedio de 47.17 $nW/m^2/sr$ para el periodo. Su distribución fue desigual: 64 % del área urbana registró valores superiores a esa media, con mayor concentración en los corredores industriales del suroriente. Este patrón sugiere una fuerte acumulación de fuentes de luz en sectores vinculados con actividades productivas y económicas. La evaluación temporal indica que estos patrones no han sido consistentes a lo largo de la década. La intensidad de la señal VIIRS aumentó gradualmente entre 2013 y 2016, especialmente en las zonas industriales de la maquila y en el este, donde se expandieron los servicios. Desde 2017, la expansión se intensificó en corredores comerciales consolidados, mientras que en áreas residenciales periféricas del occidente la tendencia disminuyó, lo cual mostró retrasos en la infraestructura de iluminación y los procesos de despoblamiento.

La tabla 2 y la figura 3 permiten leer de manera conjunta la magnitud y la distribución espacial de la diferencia de radiancia nocturna entre 2013 y 2023. Mientras la tabla resume la proporción del área urbana contenida en cada cuantil, el mapa muestra la localización concreta de esos intervalos en el espacio urbano. En este sentido, el primer cuantil, correspondiente a diferencias entre -16.5 y 0.5 $nW/m^2/sr$, se concentra principalmente en sectores del poniente de la ciudad, donde la radiancia se mantuvo estable o presentó reducciones. En contraste, el quinto cuantil, con valores entre 51.5 y 68.4 $nW/m^2/sr$, identifica los incrementos más altos y aparece en polígonos más acotados, visibles en tonos amarillos. Ambos productos muestran que el cambio temporal de la radiancia nocturna fue espacialmente desigual durante el periodo comprendido entre 2013 y 2023.

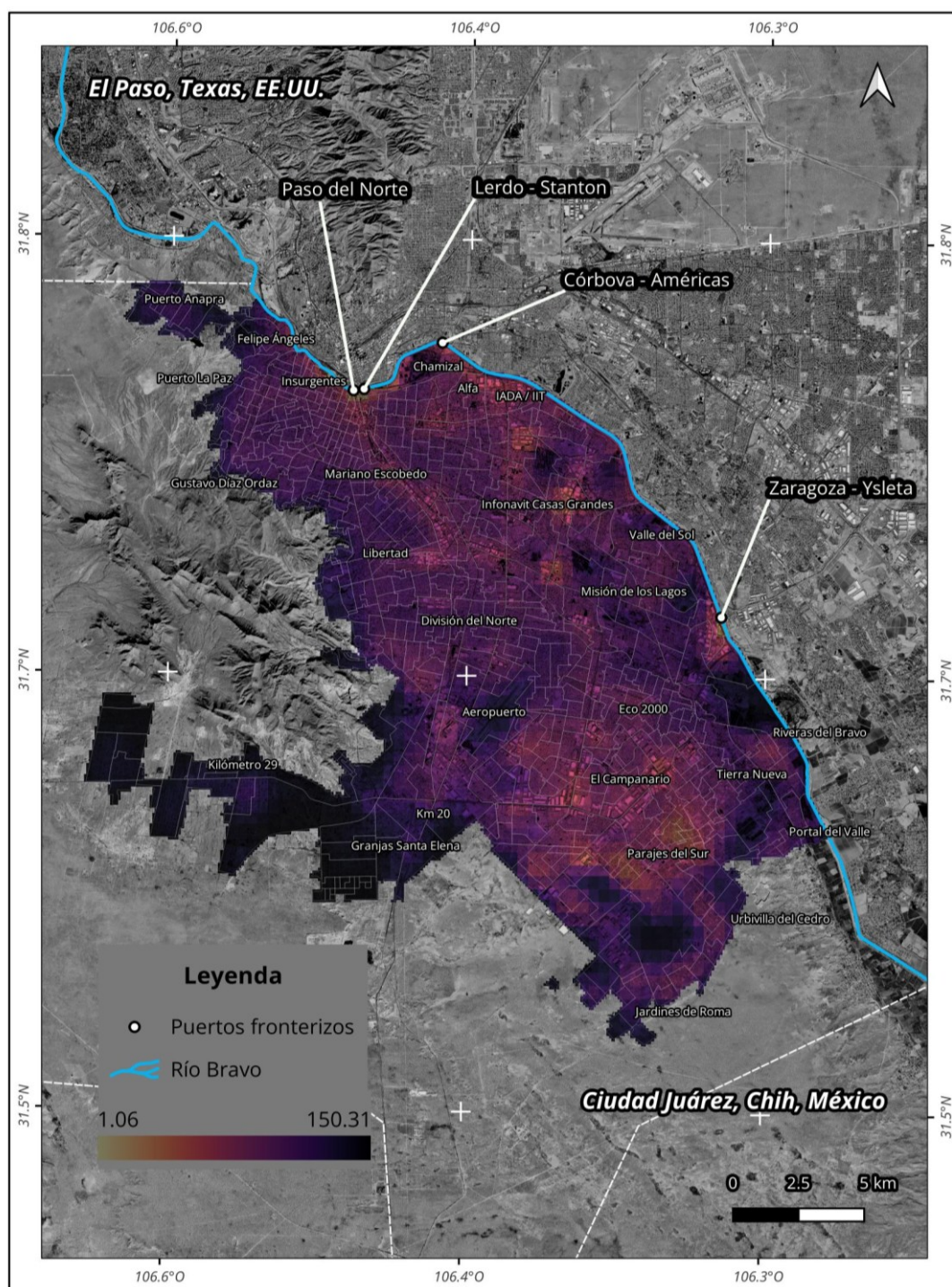


Figura 2. Distribución espacial del promedio de radiancia nocturna derivado de imágenes VIIRS en Ciudad Juárez, 2013–2023.

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024).

Comentario: el fondo en escala de grises corresponde al mapa base de referencia; la capa en color representa exclusivamente la distribución espacial del promedio de radiancia nocturna derivado de imágenes VIIRS para el periodo 2013–2023.

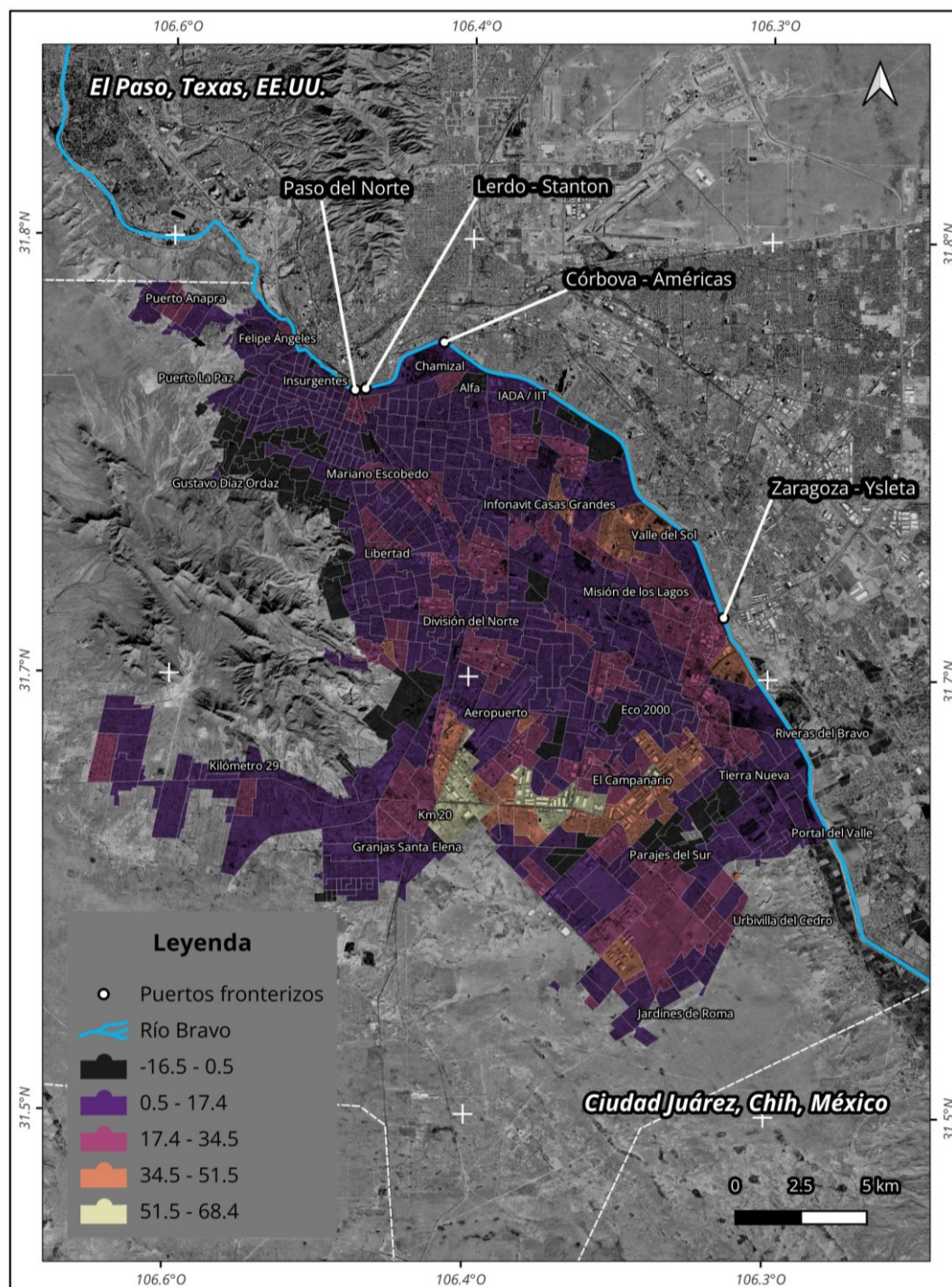


Figura 3. Distribución espacial de los cuantiles de la diferencia de radiancia nocturna entre 2013 y 2023 en Ciudad Juárez

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024)

Tabla 2. Cuantiles de la diferencia de radiancia nocturna entre 2013 y 2023

Cuantil	Intervalo (nW/m ² /sr)	Área urbana (%)
Primero	-16.55 – 0.45	8.7
Segundo	0.45 – 17.45	60.4
Tercero	17.45 – 34.45	22.2
Cuarto	34.45 – 51.45	6.2
Quinto	51.45 – 68.45	2.5
Total	—	100.0

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024)

Ambos resultados muestran que la diferencia de radiancia nocturna entre 2013 y 2023 fue predominantemente positiva, aunque de magnitud desigual. La mayor parte del área urbana (82.6 %) se concentró en los cuantiles segundo y tercero, con incrementos entre 0.45 y 34.45 nW/m²/sr, lo que indica que el aumento de la radiancia fue un proceso extendido, pero generalmente de intensidad baja a media. En contraste, los incrementos más altos, correspondientes a los cuantiles cuarto y quinto, abarcaron solo 8.7 % del área urbana, por lo que los cambios más intensos se presentaron de forma espacialmente localizada. El mapa permite observar que parte de esas áreas de mayor ganancia de radiancia coincide espacialmente con sectores donde se localiza la industria maquiladora, especialmente en el sur y suroriente de la ciudad. No obstante, en este punto la lectura debe mantenerse en el plano de la coincidencia espacial, ya que la Figura 3 describe la distribución del cambio en la radiancia nocturna y no, por sí sola, una relación causal con la actividad industrial. Por su parte, el primer cuantil, que agrupa diferencias entre -16.55 y 0.45 nW/m²/sr, representó 8.7 % del área urbana y se concentró principalmente en sectores del poniente, donde la radiancia se mantuvo estable o registró reducciones. En esta lectura, ambos productos sugieren que el cambio temporal de la radiancia nocturna fue espacialmente desigual.

3.2 Resultados del modelo GWR

Como punto de referencia analítica, se estimó primero un modelo global de regresión lineal múltiple con la radiancia nocturna media como variable dependiente. Esta especificación resultó estadísticamente significativa ($F = 139.1$; $p < 0.001$) y alcanzó un ajuste de $R^2 = 0.600$ (R^2 ajustada = 0.596), con un AIC de 5371.74. En términos generales, el modelo mostró asociaciones positivas entre la radiancia nocturna y la densidad de población, el índice socioeconómico, la longitud de vialidades principales, la densidad de kernel de la industria y la densidad de kernel del comercio y servicios, mientras que el NDVI presentó una relación negativa. Aunque esta especificación ofrece una referencia global útil, parte del supuesto de que dichas relaciones permanecen constantes en todo el espacio urbano.

Con el fin de evaluar si esa estructura era espacialmente homogénea, se estimó posteriormente un modelo de Regresión Ponderada Geográficamente (GWR). Los resultados mostraron una mejora sustantiva en el ajuste respecto del modelo global: el GWR alcanzó un R^2 de 0.940 (R^2 ajustada = 0.914) y redujo el AIC a 4262.48, lo que indica que la incorporación de variación espacial en los coeficientes permite representar con mayor precisión la estructura espacial del fenómeno. Esta diferencia confirma que la relación entre la radiancia nocturna y sus predictores no puede asumirse como uniforme en toda la ciudad.

Además de mejorar el ajuste general, el GWR evidenció variaciones espaciales importantes en la intensidad y el signo de los coeficientes locales. En varias variables, los valores mínimos y máximos mostraron cambios de signo, lo que sugiere que sus asociaciones con la radiancia nocturna dependen del contexto urbano específico en que se inscriben. En otras palabras, el efecto de la densidad de población, las condiciones socioeconómicas, la infraestructura vial, la industria, el comercio y la cobertura vegetal no opera de la misma manera en toda Ciudad Juárez. Los estadísticos descriptivos de los coeficientes locales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la Regresión Ponderada Geográficamente (GWR), Ciudad Juárez

Variable	Min.	1° Qu.	Mediana	3° Qu.	Máximo
Intercepto	-39.37	40.34	64.36	92.19	227.19
Densidad de población	-0.40	-0.04	0.04	0.11	0.35
Índice socioeconómico	-0.77	-0.12	0.09	0.35	1.75
Vialidades principales	-41.53	22.39	77.63	152.51	354.07
Industria	-1.81	-0.14	0.55	1.89	7.79
Comercio y servicios	-39.45	-1.42	1.63	11.91	67.40
NDVI	-4144.36	-890.34	-496.34	-41.86	5263.37
NDBI	-1334.31	-178.78	115.60	314.10	1324.19

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024), INEGI (2020b) y DENUE

Con el fin de presentar los resultados más nítidos del modelo y evitar una sobrecarga cartográfica, en esta sección se discuten únicamente cuatro variables: densidad de población, industria, comercio y servicios, y NDVI. Su selección responde a que muestran con mayor claridad patrones espaciales diferenciados y permiten ilustrar cuatro dimensiones complementarias de la estructura urbana: ocupación residencial, actividad productiva, centralidad funcional y presencia relativa de cobertura vegetal. Esta selección no implica que el resto de las variables carezca de relevancia, sino que estas cuatro ofrecen una lectura más clara de la heterogeneidad local captada por el GWR.

En conjunto, los resultados sugieren que la radiancia nocturna en Ciudad Juárez no responde a un único principio organizador. En algunos sectores se relaciona con la concentración de población y la continuidad del tejido urbano; en otros, con la localización de actividades industriales o con la presencia de corredores comerciales y de servicios. La cobertura vegetal, por su parte, introduce un contraste importante, ya que su asociación con la radiancia nocturna cambia según el contexto urbano en que se inserta. Más que una estructura uniforme, el modelo muestra una ciudad donde los factores asociados a la radiancia nocturna operan de manera desigual y localizada.

La interpretación de los coeficientes locales se limitó a las asociaciones espaciales observadas entre la radiancia nocturna y las variables incluidas en el modelo; cuando se plantean lecturas adicionales, estas se presentan como hipótesis interpretativas y no como relaciones causales demostradas.

3.2.1 Densidad de población

La densidad de población presentó un patrón espacial claramente diferenciado en su asociación con la radiancia nocturna, con predominio de coeficientes negativos en el norte de la ciudad y coeficientes positivos en amplios sectores del sur, surponiente y suroriente (véase Figura 4). Este comportamiento indica que la relación entre concentración demográfica y radiancia nocturna no es uniforme en Ciudad Juárez, sino que cambia según el contexto urbano en el que se inserta cada zona. Dado que la densidad de población se expresó en personas por hectárea, los coeficientes locales representan el cambio esperado en la radiancia nocturna ante incrementos en la concentración poblacional, manteniendo constantes las demás variables del modelo. En consecuencia, los coeficientes positivos indican que, en determinadas áreas, una mayor densidad de población se asocia con mayores niveles de radiancia nocturna, mientras que los negativos sugieren una relación inversa.

En los sectores del norte, donde se ubican algunos de los valores más altos de radiancia nocturna media, predominan coeficientes negativos o cercanos a cero. Este resultado sugiere que, en esas áreas, la intensidad lumínica observada no depende principalmente de la densidad de población. Más bien, parece estar asociada a otras características del espacio urbano, entre ellas la mezcla de usos, la concentración de actividades económicas, la cercanía a los cruces internacionales y la centralidad funcional que caracteriza buena parte del corredor norte-centro. Así, la existencia de alta radiancia no implica necesariamente que la concentración demográfica sea el factor con mayor peso explicativo en estos sectores.

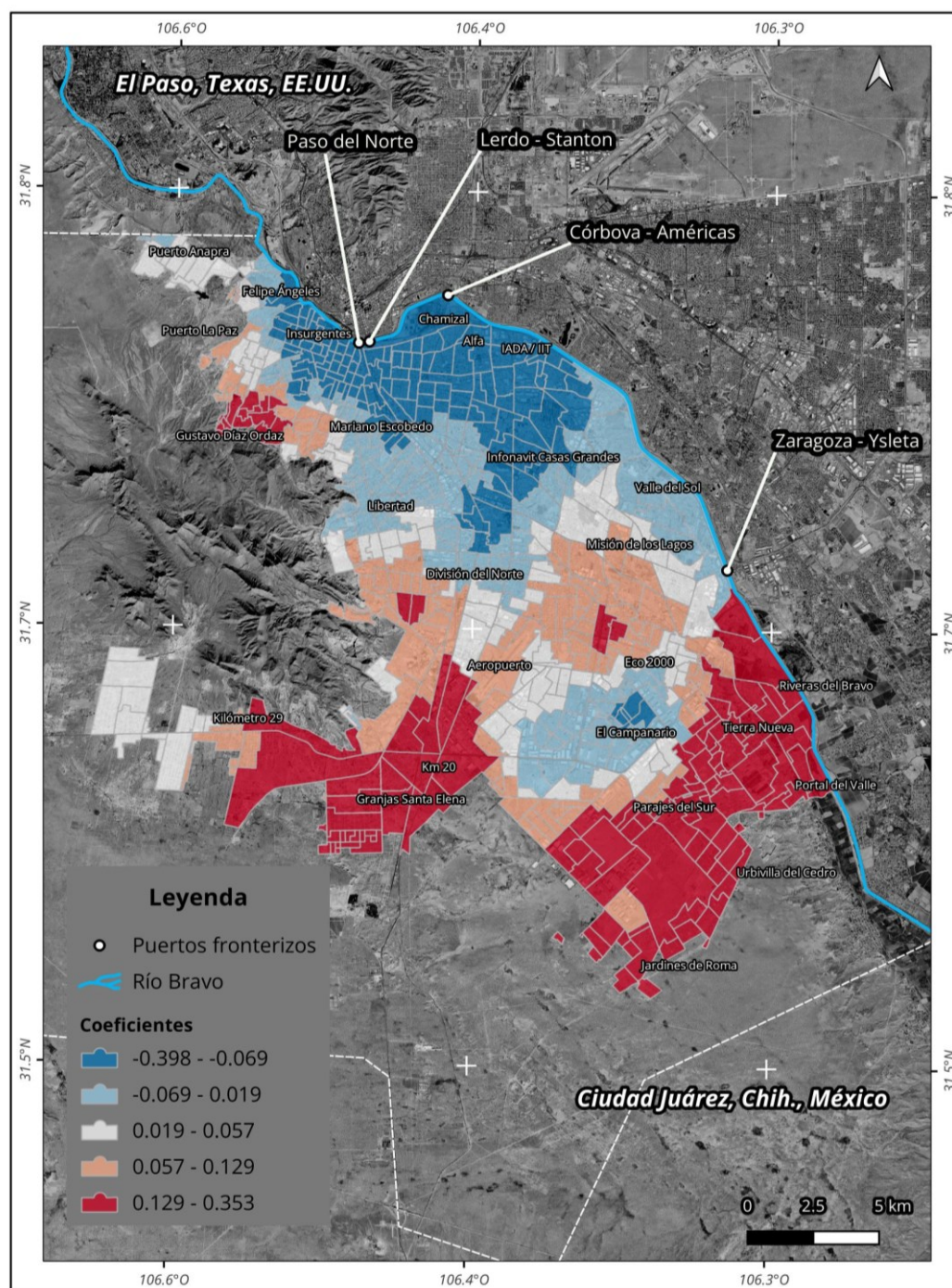


Figura 4. Coeficientes locales de la densidad de población en el modelo GWR

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024), INEGI (2020b)

En contraste, hacia el sur y, con mayor claridad, en el suroriente y parte del surponiente, los coeficientes se vuelven positivos y en varios casos alcanzan sus valores más altos. En estas zonas, la relación entre densidad de población y radiancia nocturna aparece más consistente, lo que sugiere que la concentración residencial adquiere un papel más visible en la configuración del patrón lumínico. Dicho de otro modo, en estos sectores el aumento de población por hectárea se asocia con incrementos en la radiancia nocturna. Sin embargo, esta asociación debe interpretarse con cautela: el modelo registra la intensidad lumínica observada por VIIRS y no distingue entre alumbrado público, iluminación residencial, fuentes comerciales o infraestructura privada. Por ello, un coeficiente positivo no debe equipararse automáticamente con mejor calidad o cobertura del alumbrado.

La figura también muestra que este patrón no se organiza como una simple división binaria entre norte y sur, sino como una estructura espacial más matizada. Existen zonas intermedias y polígonos

cercanos al centro urbano donde los coeficientes se aproximan a cero o cambian de signo, lo que indica que la relación entre densidad de población y radiancia nocturna está mediada por otras condiciones espaciales. En este sentido, la lectura local permite reconocer que la densidad residencial no tiene el mismo significado explicativo en toda la ciudad: en el norte, la radiancia elevada puede sostenerse por dinámicas funcionales que exceden el peso demográfico, mientras que en el sur y suroriente la densidad de población parece estar más directamente asociada con la distribución de la luz nocturna. Este resultado confirma la utilidad del GWR para identificar variaciones espaciales que quedarían atenuadas en una lectura exclusivamente global.

3.2.2 Industria

La variable industria mostró un patrón espacial heterogéneo y menos lineal de lo que podría suponerse en una ciudad con fuerte especialización maquiladora como Ciudad Juárez. Dado que este predictor se construyó a partir de una superficie de kernel generada con establecimientos del sector industrial registrados en DENU, sus coeficientes no deben interpretarse como una correspondencia directa con la localización puntual de grandes plantas manufactureras, más bien como la variación espacial del efecto asociado a la concentración relativa de ese tipo de unidades económicas sobre la radiancia nocturna.

La Figura 5 muestra que los coeficientes negativos no se concentran en un único bloque, aparecen en varios sectores del norte, centro y suroriente de la ciudad. En estos espacios, la densidad de kernel de establecimientos industriales no parece constituir el principal factor asociado a la radiancia nocturna. En términos sustantivos, ello sugiere que la luz observada en esas zonas podría depender más de otras dimensiones del espacio urbano, como la mezcla funcional, la concentración residencial, la actividad comercial o la infraestructura vial, que de la sola presencia relativa de unidades industriales registradas en DENU. Esta situación es particularmente visible en parte del corredor central y en algunos sectores del suroriente, donde la relación entre industria y radiancia resulta débil o incluso inversa.

Los coeficientes positivos más altos se concentran, en cambio, en polígonos muy específicos del surponiente, el sur y parte del suroriente, así como en algunos sectores del norponiente. En varios de estos casos la asociación positiva resulta espacialmente plausible, ya sea por la presencia de instalaciones industriales, infraestructura logística o equipamientos vinculados a actividades productivas. No obstante, el patrón no se reduce a la geografía de los parques industriales. En el surponiente, por ejemplo, los coeficientes altos parecen coincidir tanto con áreas de concentración de industria maquiladora como con áreas donde convergen equipamientos de apoyo, infraestructuras funcionales y corredores asociados a la salida poniente de la ciudad (carretera federal 2). De manera similar, algunos valores positivos en el norponiente sugieren que la variable podría estar captando configuraciones productivas o infraestructurales de alcance más localizado, y no exclusivamente grandes complejos manufactureros.

Entre ambos extremos aparecen amplias zonas con coeficientes intermedios, donde la industria mantiene una asociación positiva moderada con la radiancia nocturna. Este comportamiento sugiere que la relación entre industria y radiancia nocturna varía según el contexto urbano y adopta una distribución espacial diferenciada. En algunos sectores, la concentración relativa de establecimientos industriales parece acompañar incrementos en la radiancia; en otros, su peso se diluye frente a una estructura urbana más compleja o más densamente mixta.

La lectura de la figura 5 aconseja, por tanto, una interpretación cuidadosa. Más que expresar una relación directa y homogénea entre industria y radiancia nocturna, el coeficiente local revela que dicha asociación depende del contexto espacial en que se insertan los establecimientos registrados. En Ciudad Juárez, donde las actividades manufactureras forman parte de una economía urbana ampliamente articulada con corredores de transporte, equipamientos energéticos, nodos logísticos y áreas de uso mixto, la variable industria parece captar una combinación de espacialidades productivas y de soporte. En este sentido, el resultado ofrece una aproximación a la complejidad urbano-espacial de los espacios industriales y logísticos dentro de la ciudad.

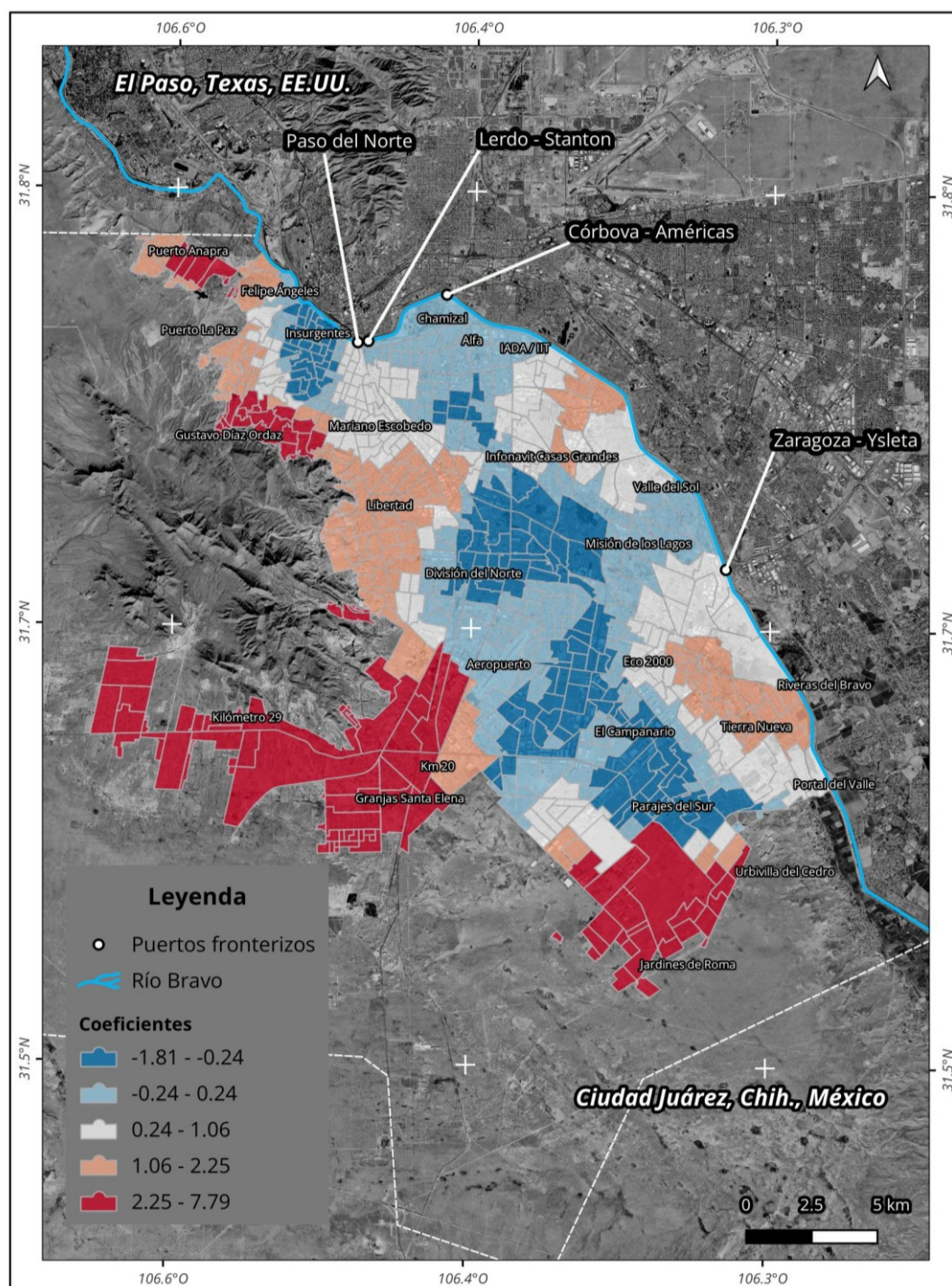


Figura 5. Coeficientes locales de la variable industria en el modelo GWR

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024), INEGI (2020b)

3.2.3 Comercio y servicios

La variable comercio y servicios presentó un patrón espacial heterogéneo y, en varios sectores, menos evidente de lo que cabría esperar si se asumiera una correspondencia directa entre concentración comercial y radiancia nocturna. Este predictor se construyó a partir de una superficie de kernel generada con establecimientos registrados en DENU, de modo que sus coeficientes expresan la variación espacial del efecto asociado a esa concentración relativa sobre la radiancia nocturna, más que una coincidencia simple con la ubicación puntual de corredores comerciales o nodos de servicios.

La Figura 6 muestra que, en parte del centro tradicional, del corredor norte-centro y de algunos sectores del suroriente predominan coeficientes negativos o bajos. Esto sugiere que, en esas áreas, la

radiancia nocturna no depende de manera predominante de la presencia relativa de comercio y servicios. En espacios centrales densamente urbanizados, donde confluyen actividades diversas, infraestructura vial, tránsito, equipamientos y proximidad a cruces internacionales, el peso específico de esta variable parece diluirse dentro de una estructura funcional más compleja. La intensidad lumínica observada en esos sectores probablemente responde a una combinación de factores urbanos superpuestos, por lo que el kernel de comercio y servicios pierde capacidad explicativa relativa.

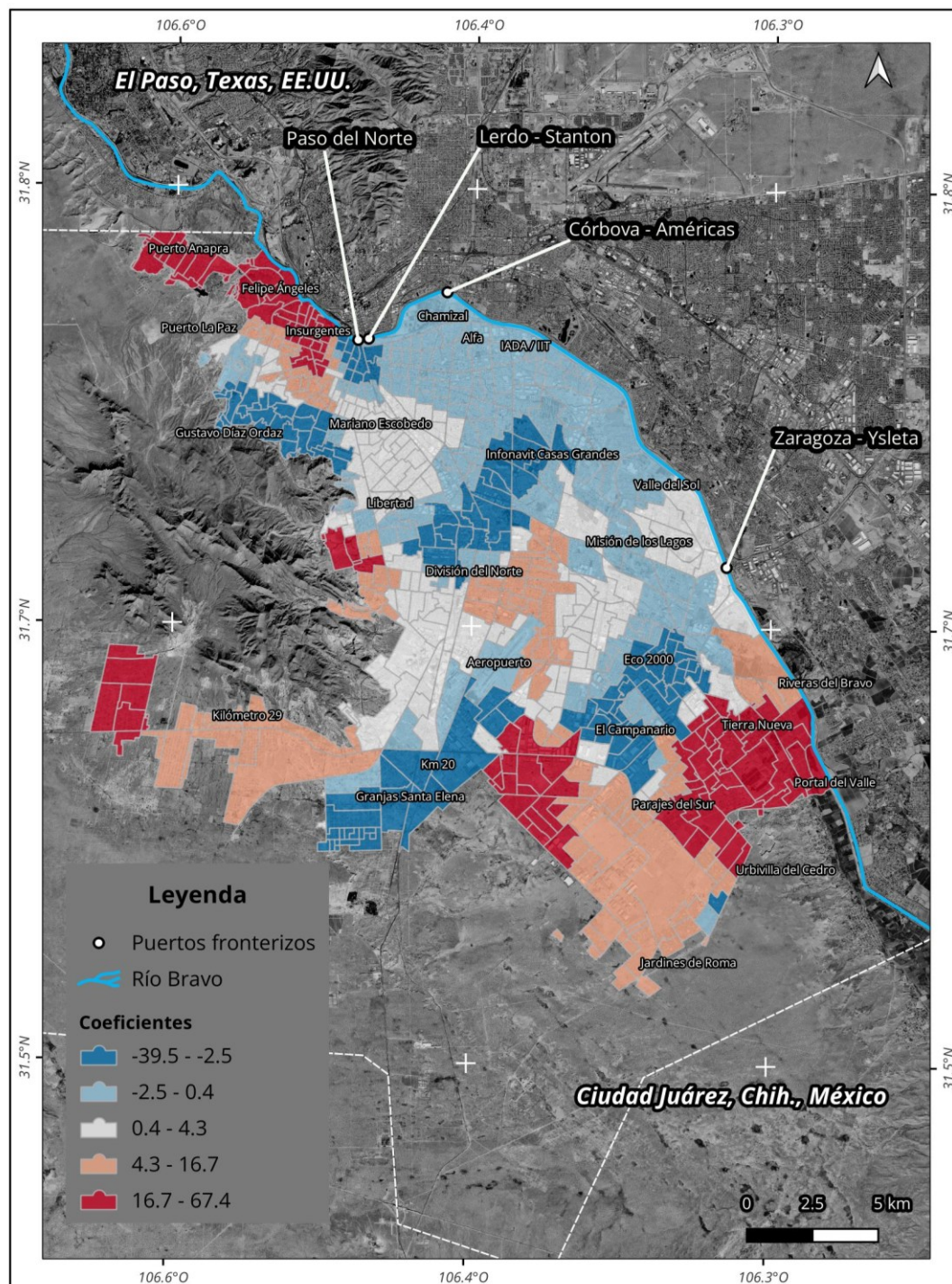


Figura 6. Coeficientes locales de la variable comercio y servicios en el modelo GWR

Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024), INEGI (2020b)

En contraste, los coeficientes más altos se concentran en polígonos específicos del norponiente y, con mayor claridad, del suroriente periférico, particularmente en sectores de Riberas del Bravo, Tierra Nueva, Portal del Valle y áreas cercanas. En estos contextos, la asociación positiva sugiere que la

presencia local de comercio y servicios adquiere un peso más visible en la configuración de la radiancia nocturna. Se trata de espacios donde la oferta comercial no necesariamente es masiva, pero puede desempeñar un papel estructurante más claro dentro del entorno inmediato. La huella lumínica asociada a pequeños nodos de actividad resulta allí más perceptible que en zonas centrales, donde la densidad funcional general tiende a absorber o mezclar múltiples fuentes de radiancia.

En esta variable también destaca Anapra, en el norponiente, donde aparecen coeficientes positivos altos pese a tratarse de un entorno periférico. Este comportamiento sugiere que, en áreas alejadas de las centralidades tradicionales, ciertas formas de comercio y servicios de proximidad pueden adquirir una relevancia espacial mayor. Más que remitir a grandes concentraciones comerciales, el resultado parece reflejar economías urbanas localizadas cuya incidencia sobre la radiancia nocturna se vuelve más visible en territorios con menor densidad funcional y menor competencia con otras fuentes de iluminación.

La interpretación, sin embargo, debe mantenerse en un plano prudente. El patrón observado puede estar relacionado con la forma en que la superficie kernel suaviza la distribución de establecimientos y con la escala a la que el modelo capta su asociación con la radiancia nocturna. Por ello, los coeficientes altos en la periferia deben entenderse como indicios de que, en ciertos sectores, la presencia localizada de comercio y servicios guarda una relación más estrecha con la radiancia observada.

Vista de manera articulada, la variable comercio y servicios pone de relieve una geografía desigual de la actividad económica urbana. En las áreas centrales, donde la concentración comercial es alta, su efecto aparece amortiguado por la superposición de funciones urbanas. En cambio, en varios sectores periféricos, la presencia de nodos comerciales y de servicios adquiere una capacidad explicativa más marcada. La figura, por tanto, dibuja una red diferenciada de economías urbanas cuya relación con la radiancia nocturna cambia según el contexto espacial.

3.2.4 NDVI

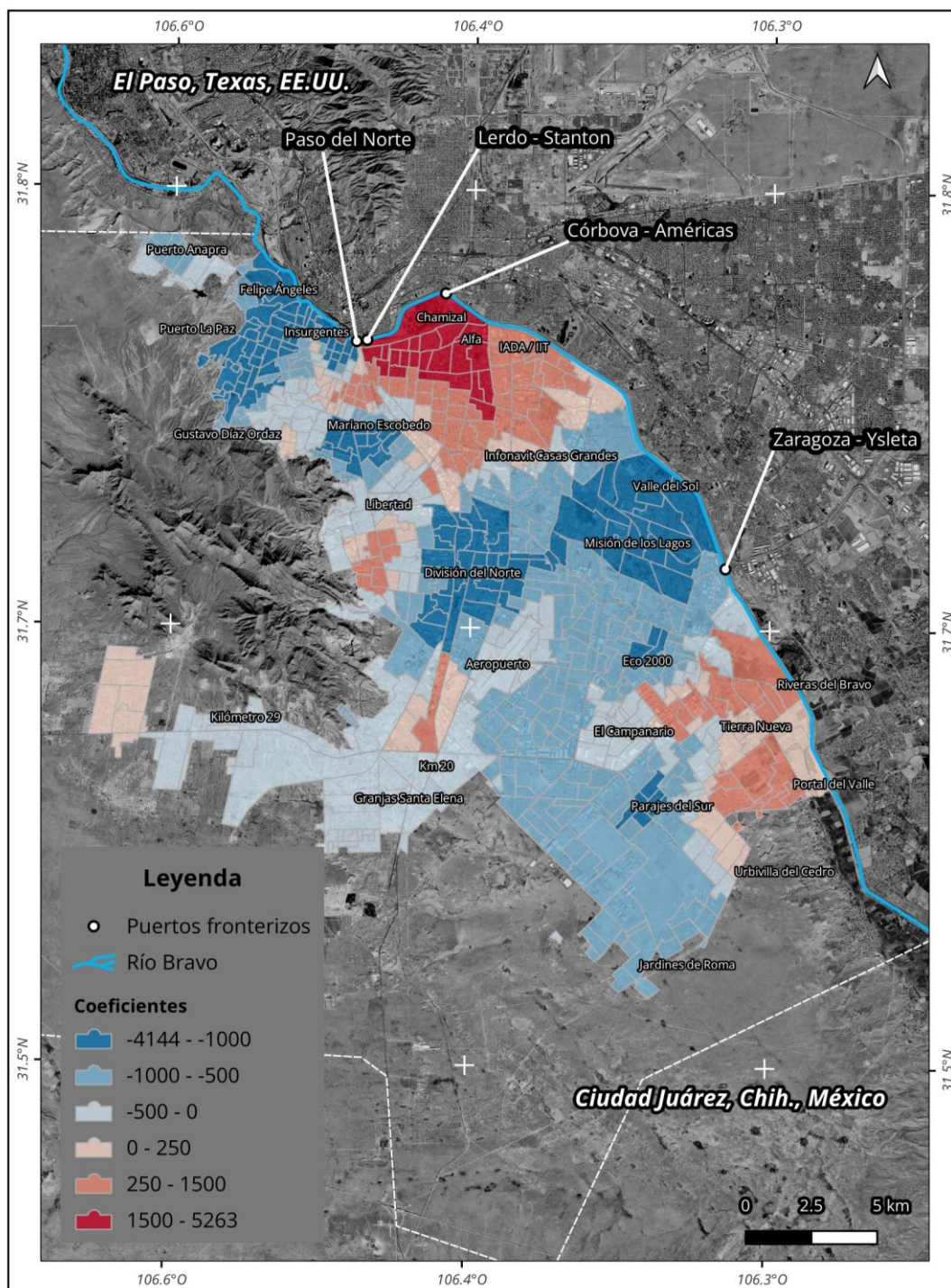
El NDVI constituye un caso particular dentro del modelo, tanto por el rango de variación de sus coeficientes como por el contexto ambiental de Ciudad Juárez. En una ciudad asentada en un entorno desértico, la vegetación urbana se distribuye de manera relativamente localizada y suele concentrarse en parques, camellones, áreas irrigadas, espacios residenciales con tratamiento paisajístico y ciertos equipamientos urbanos. En consecuencia, la relación entre NDVI y radiancia nocturna no puede leerse de forma lineal ni uniforme, ya que depende de la manera en que esas áreas verdes se insertan en la estructura funcional de la ciudad.

En términos generales, predominan coeficientes negativos en buena parte del poniente, centro-sur, sur y suroriente de la ciudad (véase Figura 7). Este patrón sugiere que, en esos sectores, valores más altos de NDVI se asocian con menores niveles de radiancia nocturna. La relación resulta coherente con espacios donde la vegetación acompaña áreas de menor intensidad funcional, bordes urbanos o zonas residenciales menos densamente equipadas. Bajo estas condiciones, el NDVI parece operar como un indicador de entornos relativamente menos intensos en términos lumínicos.

La figura también muestra, sin embargo, que esta tendencia no es universal. Los coeficientes positivos se concentran en sectores específicos, entre los que destaca con particular claridad El Chamizal y su entorno inmediato. Este caso resulta especialmente relevante porque allí convergen dos dimensiones que en principio podrían parecer disociadas: una presencia importante de cobertura vegetal y una intensa actividad urbana vinculada al cruce internacional Córdoba–Américas. En este contexto, el coeficiente positivo sugiere una coexistencia espacial entre áreas verdes y niveles elevados de radiancia nocturna. La vegetación forma parte, en este caso, de un entorno urbano intensamente equipado, vinculado con flujos de movilidad y con la proximidad de infraestructura fronteriza.

Además de El Chamizal, se observan valores positivos moderados en algunos sectores del suroriente, donde el patrón sugiere que ciertas coberturas vegetales también se insertan en áreas urbanizadas con presencia de infraestructura y actividad relativamente intensa. Esto refuerza la idea de que el NDVI no remite siempre a paisajes oscuros o escasamente intervenidos. En una ciudad como Ciudad Juárez, incluso espacios con vegetación pueden aparecer asociados a contextos con radiancia

elevada cuando forman parte de nodos estratégicos, corredores equipados o áreas residenciales y de servicios con mayor intervención urbana.



Fuente: elaboración propia con información de Google Earth Engine (2024), INEGI (2020b)

La lectura de la figura 7 aconseja, por tanto, evitar una interpretación simplificada del NDVI como variable exclusivamente atenuadora. Más bien, sus coeficientes locales muestran que el significado espacial de la vegetación cambia según el contexto en que se inscribe. En amplias zonas de la ciudad, mayores valores de NDVI se relacionan con menor radiancia; en otras, particularmente allí donde las áreas verdes coexisten con infraestructura intensa y alta actividad funcional, la relación puede volverse positiva. El coeficiente local del NDVI debe leerse, en este sentido, como una expresión situada de cómo ciertas formas de cobertura vegetal se articulan con estructuras urbanas desiguales.

4. Discusión y valoración de hallazgos

El presente estudio desarrolla tres contribuciones principales a la literatura sobre análisis urbano con sensores remotos. En primer lugar, combina información satelital multifuente (VIIRS y Landsat) con indicadores socioeconómicos intraurbanos con el fin de analizar la señal lumínica capturada por el sensor VIIRS como indicador territorial de la desigualdad urbana. En segundo lugar, pone de manifiesto la utilidad del modelo GWR para identificar variaciones espaciales en la influencia de los factores urbanos, mostrando que los determinantes de la radiación nocturna operan a distintas escalas dentro de la ciudad. Finalmente, el trabajo aporta evidencia empírica sobre ciudades fronterizas latinoamericanas, un contexto poco explorado en la literatura sobre huella lumínica y desigualdades socioespaciales.

Los resultados obtenidos sugieren que, en Ciudad Juárez, la radiancia nocturna constituye una señal sensible a disparidades urbanas de larga duración. A diferencia de lo documentado en otros contextos fronterizos (Montes Galbán 2020, Alahmadi *et al.* 2021), la densidad poblacional no organiza de forma lineal la distribución de la radiancia. Lo que emerge, más bien, es una estructura territorial desigual, donde el patrón lumínico parece depender de la articulación entre centralidad funcional, especialización económica y formas históricas de expansión urbana. La evidencia temporal muestra que una parte importante del área urbana registró incrementos en la radiancia entre 2013 y 2023, aunque esos cambios se distribuyeron de manera desigual: los aumentos más intensos se concentraron en sectores específicos, entre ellos áreas asociadas espacialmente con corredores industriales del sur y suroriente, mientras que varias zonas residenciales del poniente mantuvieron valores bajos o incluso registraron reducciones. Esta lectura dialoga con lo señalado por Small y Elvidge (2011) sobre la capacidad de la radiancia nocturna para captar diferencias urbanas; en Ciudad Juárez, sin embargo, esa señal adquiere un espesor particular por su vínculo con la historia maquiladora y con la configuración fragmentada de la ciudad (Carrillo Pérez 2024).

El contraste entre el modelo global y el GWR refuerza esta interpretación. Mientras la regresión global ofreció una referencia útil para identificar asociaciones promedio, el GWR mostró una mejora sustantiva en el ajuste y, sobre todo, hizo visible que la dirección y magnitud de los coeficientes cambian según la localización. En ese sentido, los resultados respaldan la pertinencia de un enfoque espacialmente variable para examinar la radiancia nocturna en un entorno urbano desigual. Más que identificar un único patrón, el modelo muestra que la densidad de población, la estructura socioeconómica, la infraestructura vial y la localización de actividades económicas adquieren pesos distintos en diferentes sectores de la ciudad. Esta variación coincide con planteamientos que subrayan la importancia de incorporar heterogeneidad espacial en el análisis de procesos urbanos (Brunsdon *et al.* 1998, Fotheringham *et al.* 2002, Gollini *et al.* 2015).

La relación con la vegetación resultó particularmente sugerente. El NDVI mantuvo una tendencia central negativa, lo que es consistente con la asociación entre cobertura vegetal y menores niveles de radiancia nocturna en varias zonas de la ciudad, tal como han mostrado Huang *et al.* (2021) y Liu *et al.* (2022). Sin embargo, el patrón no fue uniforme. Sectores como El Chamizal y algunos polígonos del suroriente presentaron coeficientes positivos, lo que sugiere que ciertas áreas verdes pueden coexistir con espacios de alta intensidad funcional y elevada radiancia. Esta observación matiza una lectura universal del NDVI como simple indicador atenuador. En una ciudad desértica y fronteriza como Ciudad Juárez, la vegetación urbana puede formar parte de entornos fuertemente equipados, atravesados por movilidad, infraestructura de control fronterizo y actividad económica, de modo que su relación con la radiancia depende del contexto espacial en que se inserta.

A la luz de estos hallazgos, el estudio se inserta en varios debates teóricos. Uno de ellos remite a la justicia ambiental y a la desigual distribución de beneficios y cargas urbanas. Las áreas con baja radiancia, particularmente en zonas periféricas y de menor consolidación, sugieren la existencia de espacios donde la infraestructura lumínica permanece rezagada, una situación que dialoga con la discusión planteada por Nadybal *et al.* (2020) sobre la dimensión espacial de la contaminación lumínica y sus desigualdades asociadas. Otro debate se relaciona con el modelado estadístico urbano. La comparación entre la regresión global y el GWR confirma la utilidad de incorporar variación espacial en el análisis de ciudades fragmentadas, ya que una especificación promedio tiende a simplificar relaciones que en la práctica son espacialmente diferenciadas. Finalmente, los resultados también invitan a matizar la aplicación uniforme de índices biofísicos como NDVI y NDBI en ecología urbana, pues su

comportamiento aparece mediado por condiciones locales de urbanización y configuración territorial (Kebede *et al.* 2022).

Desde una perspectiva aplicada, estos resultados abren preguntas relevantes para la política urbana local. La distribución de la radiancia observada sugiere que la infraestructura lumínica se concentra con mayor intensidad en corredores económicos y áreas funcionalmente estratégicas, mientras que amplios sectores residenciales periféricos permanecen en posiciones más débiles dentro de la geografía nocturna de la ciudad. Esta orientación guarda cierta afinidad con lo documentado para otras ciudades donde la inversión en iluminación se vincula a nodos económicos y corredores de actividad (Alahmadi *et al.* 2021), aunque también pone en evidencia una tensión con contextos urbanos donde la prioridad del alumbrado se relaciona más estrechamente con zonas residenciales y argumentos de seguridad cotidiana (Montes Galbán 2020). En el caso de Ciudad Juárez, la radiancia nocturna permite observar esa selectividad espacial de forma especialmente clara.

La investigación también presenta limitaciones que conviene reconocer. El trabajo a nivel AGEB puede ocultar diferencias más finas dentro de cada unidad espacial, tal como han advertido Zheng *et al.* (2021) en estudios semejantes. A ello se suma que los datos de VIIRS no registran todas las formas de iluminación urbana, particularmente aquellas que no se expresan con la misma intensidad en el exterior o que dependen de condiciones específicas de observación (Elvidge *et al.* 2021). Finalmente, las variables socioeconómicas corresponden a un único corte censal, 2020, de modo que el componente explicativo del modelo no reproduce toda la variación temporal contenida en la serie 2013–2023. Esta limitación no invalida los resultados, pero sí sugiere la conveniencia de futuros trabajos que incorporen mediciones *in situ*, series socioeconómicas comparables y unidades espaciales de mayor detalle.

5. Conclusiones

Esta investigación analizó los patrones espaciales de la radiancia nocturna captada por VIIRS en Ciudad Juárez mediante la integración de imágenes VIIRS y Landsat 8 con variables sociodemográficas, económicas y biofísicas a escala de AGEB urbana. Los resultados permitieron alcanzar el objetivo general del estudio al mostrar que la distribución de la radiancia nocturna se encuentra espacialmente diferenciada y que su asociación con distintos atributos urbanos cambia según la localización dentro de la ciudad.

El análisis temporal mostró que, entre 2013 y 2023, la radiancia nocturna aumentó de manera predominantemente positiva, aunque con una distribución desigual. Los incrementos más intensos se concentraron en sectores específicos, mientras que amplias áreas residenciales del poniente mantuvieron valores bajos o incluso registraron reducciones. Este comportamiento confirma que la geografía nocturna de Ciudad Juárez expresa contrastes urbanos persistentes y se relaciona con procesos de urbanización desigual.

El modelo global ofreció una referencia inicial útil, pero el GWR permitió reconocer con mayor claridad la heterogeneidad espacial de las relaciones analizadas. La densidad de población, el índice socioeconómico, las vialidades principales, la industria, el comercio y los servicios, así como el NDVI y el NDBI, mostraron asociaciones localmente diferenciadas con la radiancia nocturna. Esto indica que la radiancia responde a configuraciones locales específicas, en las que cambian tanto la intensidad como el signo de los coeficientes.

Entre los hallazgos más relevantes destaca que la radiancia nocturna no depende linealmente de la densidad poblacional y que su distribución se vincula con la centralidad urbana, la infraestructura vial y de control fronterizo, así como con la localización de actividades económicas. También se observó que la cobertura vegetal mantiene una tendencia predominantemente negativa en su relación con la radiancia, aunque con excepciones localizadas en espacios urbanos donde las áreas verdes coexisten con una elevada intensidad de uso.

El estudio aporta, en primer término, evidencia empírica sobre una ciudad fronteriza latinoamericana poco explorada en este campo. En segundo lugar, muestra el valor de articular información satelital multifuente con indicadores intraurbanos para examinar desigualdades espaciales.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren la necesidad de revisar los criterios espaciales con los que se distribuye la infraestructura lumínica en Ciudad Juárez. La persistencia de sectores con baja radiancia, frente a corredores donde esta se concentra con mayor intensidad, plantea la conveniencia de políticas más sensibles a las diferencias internas de la ciudad.

La investigación presenta algunas limitaciones. La agregación a nivel de AGEb puede ocultar diferencias intraurbanas más finas; los datos de VIIRS no captan todas las formas de iluminación urbana; y las variables socioeconómicas corresponden a un único corte censal, lo que restringe la dimensión temporal del componente explicativo. A partir de ello, futuras investigaciones podrían incorporar unidades espaciales de mayor detalle, mediciones *in situ* y aproximaciones cualitativas que permitan profundizar en la experiencia urbana de la noche.

En cierre, la principal conclusión de este trabajo es que la radiancia nocturna constituye un indicador pertinente para examinar desigualdades urbanas en Ciudad Juárez. Su distribución hace visibles diferencias urbano-espaciales persistentes y ofrece una base empírica útil para pensar la ciudad desde los estudios urbanos y la justicia espacial.

6. Acknowledgments

Agradecemos a las personas dictaminadoras por sus comentarios y sugerencias, que permitieron mejorar sustancialmente la calidad del manuscrito.

Referencias

- Alahmadi, M., Mansour, S., Martin, D., Atkinson, P. M. (2021). “An improved index for urban population distribution mapping based on nighttime lights (DMSP-OLS) data: an experiment in Riyadh Province, Saudi Arabia”, *Remote Sensing*, 13(6), 1171–1194. <https://doi.org/10.3390/rs13061171>
- Bivand, R. (2022). R packages for analyzing spatial data: A comparative case study with areal data. *Geographical Analysis*, 54(3), 488–518. <https://doi.org/10.1111/gean.12319>
- Bivand, R. S., Wong, D. W. S. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *TEST*, 27(3), 716–748. <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>
- Bivand, R., Pebesma, E., Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R* (2nd ed.). Springer: New York.
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., Charlton, M. E. (1998). “Geographically weighted regression”, *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(3), 431–443.
- Carrillo, M. J., Pérez, J. (2024). “The communal roots of Mexico’s maquila industry: urbanization, land, and inequality in Ciudad Juárez, 1960–2000”, *Latin American Research Review*, 1–24. <https://doi.org/10.1017/lar.2024.35>
- Cheng, L., Wang, L., Feng, R., Yan, J. (2021). “Remote sensing and social sensing data fusion for fine-resolution population mapping with a multimodel neural network”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 5973–5987. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3086139>
- Chepesiuk, R. (2009). “Missing the dark: health effects of light pollution”, *Environmental Health Perspectives*, 117(1). <https://doi.org/10.1289/ehp.117-a20>
- da Silva, A. R., Fotheringham, A. S. (2016). “The multiple testing issue in geographically weighted regression”, *Geographical Analysis*, 48(3), 233–247. <https://doi.org/10.1111/gean.12084>
- Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., Ghosh, T. (2017). “VIIRS night-time lights”, *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860–5879. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>
- Elvidge, C. D., Zhizhin, M., Ghosh, T., Hsu, F.-C., Taneja, J. (2021). “Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages: 2012 to 2019”, *Remote Sensing*, 13(5), 922. <https://doi.org/10.3390/rs13050922>

- Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C. D., Keith, D. M., Haim, A. (2011). "Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility", *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2714–2722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>
- Fotheringham, A. S., Brunson, C., Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*. Wiley: England.
- Fuentes, C., Hernández, V. (2013). "Segregación socioespacial y accesibilidad al empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (2000-2004)", *Región y Sociedad*, XXV(56), 43–74. <https://doi.org/10.22198/rys.2013.56.a99>
- Fuentes, C., Hernández, V. (2015). "La evolución espacial de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (1994-2004): un análisis con indicadores de autocorrelación espacial global y local", *Estudios Demográficos y Urbanos*, 30(2), 433–467.
- Gollini, I., Lu, B., Charlton, M., Brunson, C., Harris, P. (2015). GWmodel: An R package for exploring spatial heterogeneity using geographically weighted models. *Journal of Statistical Software*, 63(17), 1–50. <https://doi.org/10.18637/jss.v063.i17>
- Google Earth Engine. (2024). *Google Earth Engine*. [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: <https://earthengine.google.com>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., Shao, G. (2021). "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing", *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- IMIP. (2016). *Plan de desarrollo urbano sostenible*. Chihuahua, Instituto Municipal de Investigación y Planeación.
- INEGI. (1943). *Sexto censo de población 1940*. Chihuahua, INEGI. [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825411824>
- INEGI. (2020a). *Censo de población y vivienda 2020*. [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020>
- INEGI. (2020b). *Directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE)*. [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue>
- INEGI. (2025). *Encuesta nacional de seguridad pública urbana (ENSU): resultados octubre-diciembre 2024*. [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ensu/doc/ensu2024_diciembre_presentacion_ejecutiva.pdf
- Kawamura, M., Jayamana, S., Tsujiko, Y. (1996). "Relation between social and environmental conditions in Colombo Sri Lanka and the urban index estimated by satellite remote sensing data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 321–326.
- Kebede, T. A., Hailu, B. T., Suryabagavan, K. V. (2022). "Evaluation of spectral built-up indices for impervious surface extraction using Sentinel-2A MSI imageries: a case of Addis Ababa city, Ethiopia", *Environmental Challenges*, 8, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100568>
- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez de Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., Elvidge, C. D. (2020). "Remote sensing of night lights: a review and an outlook for the future", *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- Liu, S., Zhao, X., Zhang, F., Qiu, A., Chen, L., Huang, J., Chen, S., Zhang, S. (2022). "Spatial downscaling of NPP-VIIRS nighttime light data using multiscale geographically weighted regression and multi-source variables", *Remote Sensing*, 14(24), 6400. <https://doi.org/10.3390/rs14246400>
- Lu, B., Charlton, M., Harris, P., Fotheringham, A. S. (2014). Geographically weighted regression with a non-Euclidean distance metric: A case study using hedonic house price data. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(4), 660–681. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.865739>

- Lunn, R. M., Blask, D. E., Coogan, A. N., Figueiro, M. G., Gorman, M. R., Hall, J. E., Hansen, J., Nelson, R. J., Panda, S., Smolensky, M. H., Stevens, R. G., Turek, F. W., Vermeulen, R., Carreón, T., Caruso, C. C., Lawson, C. C., Thayer, K. A., Twery, M. J., Ewens, A. D., ... Boyd, W. A. (2017). "Health consequences of electric lighting practices in the modern world: a report on the National Toxicology Program's workshop on shift work at night, artificial light at night, and circadian disruption", *Science of The Total Environment*, 607–608, 1073–1084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.056>
- Maycotte, E., Sánchez, E., Argomedeo, M. Á. (2010). "De las islas de utopía a los espacios de la marginación: el impacto de las políticas de vivienda de México en Ciudad Juárez, Chihuahua", *Scripta Nova*, XIV (331). [Accedido 12-09-2025]. Disponible en: <https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1505>
- Montes Galbán, E. (2020). "Expansión y densificación urbana del Gran Buenos Aires (2012-2019) a partir de imágenes satelitales nocturnas", *Geográfica Digital*, 17(33), 2–16. <https://doi.org/10.30972/geo.17334097>
- Nadybal, S. M., Collins, T. W., Grineski, S. E. (2020). "Light pollution inequities in the continental United States: a distributive environmental justice analysis", *Environmental Research*, 189, 109959. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109959>
- Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E. Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science. With Applications in R*. Chapman and Hall/CRC: New York.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Rich, C., Longcore, T. (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press, Washington D.C.
- Small, C., Elvidge, C. D. (2011). "Mapping decadal change in anthropogenic night light", *Procedia Environmental Sciences*, 7, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.061>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. (2023). *dplyr: A grammar of data manipulation (R package)*. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dplyr>
- Zheng, Y., Tang, L., Wang, H. (2021). "An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI", *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>.