

Relación fractal, densidad poblacional y desarrollo humano en América Latina: Enfoque para planificación urbana sostenible

Fractal relationship, population density and human development in Latin America: Approach for sustainable urban planning

DOI: 10.17981/mod.arq.cuc.32.1.2024.01

Article.

Fecha de Recepción: 01/09/2023.

Fecha de Aceptación: 20/12/2023.

Fecha de Publicación: 15/01/2024

Diego Marcelo Tipán Renjifo 

Universidad Tecnológica Indoamérica. Guayaquil (Ecuador)
diegotipan@uti.edu.ec

Carmen Mariela Vaca Lovato 

Universidad Tecnológica Indoamérica. Guayaquil (Ecuador)
cmvl23@gmail.com

Nancy de Lourdes Jordán Buenaño 

Universidad Tecnológica Indoamérica. Guayaquil (Ecuador)
nancyjordan@uti.edu.ec

Para citar este artículo:

Tipán, D., Vaca, C. y Jordán, N. (2024). Relación fractal, densidad poblacional y desarrollo humano en América Latina: Enfoque para planificación urbana sostenible. *MODULO ARQUITECTURA CUC*, 32, 9–24. <http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.32.1.2024.01>

Resumen

Este estudio investiga la relación entre dimensión fractal, densidad poblacional y el Índice de Desarrollo Humano –IDH– en países de América Latina. Utiliza el software “FractalDT” y datos de imágenes satelitales para calcular la dimensión fractal de cada país, evaluando así la complejidad de sus sistemas urbanos. El propósito es comprender cómo esta complejidad se relaciona con el desarrollo humano y la densidad poblacional, analizando la correlación mediante el coeficiente de Pearson. Los resultados subrayan la diversidad de estructuras urbanas en América Latina: países con una mayor dimensión fractal tienden a ser más compactos y organizados, mientras que aquellos con una menor dimensión fractal muestran mayor irregularidad. Este enfoque busca proporcionar una perspectiva integral de los sistemas urbanos en la región y promover estrategias efectivas para la planificación urbana sostenible.

Palabras clave: Densidad poblacional; dimensión fractal; Índice de Desarrollo Humano (IDH)

Abstract

This study investigates the relationship between fractal dimension, population density and the Human Development Index –HDI– in Latin American countries. It uses the “FractalDT” software and satellite image data to calculate the fractal dimension of each country, thus assessing the complexity of its urban systems. The purpose is to understand how this complexity is related to human development and population density, analyzing the correlation through the Pearson coefficient. The results underline the diversity of urban structures in Latin America: countries with a greater fractal dimension tend to be more compact and organized, while those with a smaller fractal dimension show greater irregularity. This approach seeks to provide a comprehensive perspective of urban systems in the region and promote effective strategies for sustainable urban planning.

Keywords: Fractal dimension; Population density; Human Development Index (HDI)

INTRODUCCIÓN

La dimensión fractal se ha consolidado como una herramienta poderosa en el estudio de sistemas complejos, generando un creciente interés en la comunidad científica (Chen & Zhang, 2019; Gilarranz, 2019). Su aplicación al análisis de entornos urbanos ha resultado particularmente intrigante y prometedora. En este contexto, surge el estudio titulado “Relación Fractal, Densidad Poblacional y Desarrollo Humano en América Latina: Enfoque para la Planificación Urbana Sostenible”, que se enfoca en la exploración de las interacciones entre tres dimensiones fundamentales: la dimensión fractal, la densidad poblacional y el Índice de Desarrollo Humano –IDH– en países de América Latina.

La dimensión fractal ha aportado una perspectiva innovadora para comprender la estructura y complejidad de los paisajes urbanos latinoamericanos. Su cálculo y análisis permiten desentrañar patrones y características únicas que, a simple vista, resultan imperceptibles (Arriola, 2022). La dimensión fractal nos brinda la capacidad de evaluar la irregularidad, autosimilitud y complejidad geométrica de los entornos urbanos. Estos atributos son esenciales para comprender la organización espacial de las ciudades y ofrecen conocimientos valiosos para la planificación urbana, el desarrollo sostenible y la calidad de vida de los ciudadanos (Paris, 2020).

El objetivo central de esta investigación es examinar la dimensión fractal en los países latinoamericanos y su relación con otros indicadores clave, como el desarrollo humano y la densidad poblacional. Esto tiene la finalidad de proporcionar una visión integral de los sistemas urbanos en la región y promover enfoques más efectivos para la planificación urbana inclusiva y sostenible (Calderón, 2017).

Es importante recordar la definición de fractal la cual según Bharathi et al. (2021), describe un objeto geométrico o conjunto de números que muestra una estructura auto similar en diferentes escalas, repitiéndose infinitamente a medida que se amplía o reduce. Estos objetos fractales poseen propiedades matemáticas intrigantes, incluyendo una complejidad infinita y una irregularidad intrínseca, lo que ha llevado a su amplio uso en campos que abarcan desde la física y la biología hasta la economía y la informática (Bustillos, 2022). Es de subrayar que la escala fractal de las ciudades se relaciona con la estructura geométrica en diferentes dimensiones, clasificándola en tres categorías: longitudinales, transversales y espaciales. Si bien se han llevado a cabo numerosos estudios sobre las dos primeras categorías, la alometría espacial ha recibido menos atención. Las relaciones entre diferentes medidas espaciales dentro de las curvas límite de una ciudad siguen la ley de escala fractal, lo que indica la estructura fractal de las ciudades. A partir de

esta estructura espacial, se derivan tres dimensiones fractales, lo que revela características únicas de los sistemas urbanos en términos de complejidad y organización geométrica. Este enfoque proporciona una perspectiva fresca sobre la aplicación del análisis fractal en la comprensión de las ciudades y su estructura espacial.

La relación entre la densidad poblacional y la dimensión fractal de los países latinoamericanos se presenta como un tema de investigación relevante y de creciente interés. Según Méndez (2007), “la combinación de la densidad poblacional y la dimensión fractal proporciona una visión más profunda de la organización espacial y la complejidad de los sistemas urbanos en la región” (p. 55). Este enfoque integral ofrece perspectivas valiosas para la planificación urbana sostenible y la distribución equitativa de recursos. Al comprender cómo la densidad poblacional influye en la estructura fractal de los países, se pueden identificar áreas de alta densidad que requieren intervenciones específicas, así como áreas de baja densidad con características fractales únicas que necesitan un enfoque especial.

La presente investigación se propone explorar en profundidad la relación entre la densidad poblacional y la dimensión fractal de los países latinoamericanos. Esto tiene el propósito de proporcionar información más precisa para la toma de decisiones en el ámbito urbano y promover un desarrollo equitativo y sostenible en la región.

El IDH se ha consolidado como una medida integral del desarrollo humano en diferentes países (Mendoza y Pérez, 2021). Este índice combina indicadores de educación, esperanza de vida y nivel de vida para evaluar el bienestar general de una población. No obstante, para una comprensión plena de los factores que impulsan el desarrollo humano, es necesario explorar nuevas perspectivas y enfoques (Förster y López, 2022).

En este contexto, la dimensión fractal ha emergido como un concepto matemático que podría proporcionar una medida adicional y complementaria para comprender la complejidad y la estructura de los sistemas socioeconómicos. La dimensión fractal posibilita el análisis de cómo interactúan diferentes elementos y componentes de un sistema y cómo se organizan a diferentes escalas. Por lo tanto, en este artículo, se explora la posible relación entre el IDH y la dimensión fractal en los países de América Latina, con el objetivo de mejorar la comprensión de los determinantes del desarrollo humano en la región (Jordán et al., 2017).

La relación entre el IDH y la dimensión fractal es un tema de creciente interés en el campo de los estudios del desarrollo (David et al., 2020). La dimensión fractal puede proporcionar una nueva perspectiva para analizar y comprender la estructura y la complejidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales (McCaffrey & Boucher, 2022).

La aplicación de técnicas de geometría fractal brinda una medida cuantitativa de la dimensión

fractal de un país, lo que captura la distribución espacial de sus componentes y su organización (Martínez et al., 2023). Existe la posibilidad de que los países con un mayor nivel de desarrollo humano también exhiban una mayor complejidad y estructura fractal en su organización socioeconómica (Buscema et al., 2022).

Investigar esta posible relación en los países de América Latina puede aportar nuevas perspectivas y conocimientos sobre los factores que impulsan el desarrollo humano en la región. En este artículo, se presenta un análisis preliminar de la relación entre el IDH y la dimensión fractal en los países latinoamericanos, utilizando datos disponibles y aplicando enfoques metodológicos apropiados (Mendoza y Pérez, 2021).

El problema abordado en este trabajo de investigación radica en la necesidad de comprender la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH en los países de América Latina. A pesar de que el IDH se utiliza ampliamente como una medida integral del desarrollo humano, existen otras dimensiones y factores que pueden influir en dicho desarrollo (Kavuran et al., 2023).

La dimensión fractal, como una medida de la complejidad y la organización de los sistemas socioeconómicos, ofrece una perspectiva novedosa y complementaria que podría ayudar a explicar cómo interactúan estos elementos en la región latinoamericana (Liu et al., 2022).

Los objetivos fundamentales de este trabajo de investigación son los siguientes:

- Investigar exhaustivamente la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH en los países de América Latina.
- Ofrecer una visión integral de los sistemas urbanos en la región, proporcionando datos y análisis precisos que respalden la planificación urbana inclusiva y sostenible.
- Contribuir significativamente al conocimiento científico sobre el desarrollo humano en América Latina.

Este estudio busca aportar nuevas perspectivas y conocimientos al campo de los estudios del desarrollo humano en la región. Al explorar la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH, se espera generar evidencia empírica que contribuya a un mejor entendimiento de los factores que impulsan el desarrollo humano en la región y, en última instancia, a la formulación de políticas y estrategias más efectivas para promover el bienestar de la población latinoamericana.

Facilitar un enfoque multidisciplinario en la investigación del desarrollo humano en América Latina. La inclusión de la dimensión fractal como variable permite una perspectiva interdisciplinaria que combina las matemáticas con la sociología, la economía y la planificación urbana, enriqueciendo así nuestra comprensión de los factores que influyen en el desarrollo humano en esta región diversa y compleja.

Proponer recomendaciones y pautas prácticas para la toma de decisiones en políticas públicas y planificación urbana. A medida que se avance

en la investigación y se comprenda mejor la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH, se podrán formular recomendaciones específicas para abordar desafíos urbanos y socioeconómicos en América Latina. Estas recomendaciones pueden contribuir a la promoción de un desarrollo más equitativo, sostenible y de alta calidad de vida para los habitantes de la región.

En la [Tabla 1](#) se observa la densidad poblacional y el índice desarrollo humano obtenido a partir de los datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe ([CEPAL, 2023](#)).

- *La densidad poblacional:* La densidad poblacional varía significativamente entre los países analizados, oscilando desde 11 277 ha por km² en Bolivia hasta 64 150 ha por km² en Ecuador. Estos números reflejan la concentración de la población en áreas urbanas y la presión sobre los recursos disponibles en cada país.
- *IDH:* El Índice de Desarrollo Humano es una medida compuesta que tiene en cuenta factores como la esperanza de vida, el nivel educativo y el ingreso per cápita. Los valores de IDH van de 0 a 1, donde 1 representa el desarrollo humano más alto. En la [Tabla 1](#) los países presentan valores que oscilan entre 0.691 en Venezuela y 0.855 en Chile. Argentina y Uruguay también tienen un IDH destacado, con valores de 0.842 y 0.809 respectivamente.

TABLA 1. Densidad poblacional e Índice de Desarrollo Humano.

País	Densidad Poblacional (hab/km ²)	El Índice de Desarrollo Humano
Argentina	16.463	0.842
Bolivia	11.277	0.692
Brasil	25.414	0.754
Chile	25.962	0.855
Colombia	45.732	0.752
Ecuador	64.150	0.74
Paraguay	16.869	0.717
Perú	26.729	0.762
Uruguay	19.414	0.809
Venezuela	31.619	0.691

Fuente: Elaborado por los investigadores.

METODOLOGÍA

La metodología implementada en este estudio representa una parte crucial de la investigación, ya que nos permite explorar la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH en América Latina de manera rigurosa y cuantitativa. A continuación, se detallan las etapas de la metodología de forma más profunda:

Adquisición de imágenes satelitales

En una fase inicial se obtuvieron imágenes satelitales de alta resolución de los países de América Latina. Estas imágenes se descargaron de fuentes geoespaciales confiables, como los institutos geográficos nacionales y agencias espaciales. La elección de fuentes confiables es esencial para garantizar la precisión y la calidad de los datos iniciales.

Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes satelitales descargadas pueden ser de gran tamaño y resolución. Para facilitar el análisis posterior, se sometieron a un proceso de preprocesamiento. Esto incluyó la segmentación de las imágenes en diferentes regiones o áreas de interés. En este caso, se crearon mapas específicos para cada país. El objetivo del preprocesamiento es convertir las imágenes en un formato más manejable y enfocarse en las áreas de interés para el estudio.

Cálculo de la Dimensión Fractal

Una vez que se obtuvieron las imágenes procesadas, se empleó un programa desarrollado en Python específicamente para calcular la dimensión fractal de cada país. Este programa utilizó técnicas avanzadas de geometría fractal para analizar los patrones de distribución espacial y la complejidad de las regiones seleccionadas en las imágenes. Como resultado, se obtuvieron mediciones cuantitativas de la dimensión fractal para cada país. Esta etapa es fundamental, ya que proporciona una base objetiva para evaluar la complejidad de la organización espacial de los países.

Recopilación de Datos demográficos y de Desarrollo humano

Paralelamente, se recopilaron datos demográficos, como la densidad poblacional, y los índices de desarrollo humano correspondientes para los países de América Latina. Estos datos se obtuvieron de fuentes fiables, como organismos gubernamentales y publicaciones académicas, como la CEPAL. La elección de fuentes de datos confiables es esencial para garantizar la validez y la confiabilidad de los resultados.

Análisis de correlación

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de correlación uno a uno entre las dimensiones fractales calculadas, la densidad poblacional y

los IDH de cada país. Este análisis permitió evaluar de manera sistemática y estadísticamente la posible relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el desarrollo humano en la región. Los resultados de este análisis ofrecen una visión más profunda de cómo estos factores se relacionan entre sí.

La metodología utilizada en este estudio combina técnicas de procesamiento de imágenes, análisis fractal y análisis estadístico para investigar la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el índice de desarrollo humano en los países de América Latina. Esta metodología proporciona un enfoque integral y cuantitativo para comprender la complejidad y la organización de los sistemas socioeconómicos en la región y su impacto en el desarrollo humano. Los pasos detallados en la metodología aseguran la validez y la precisión de los resultados, lo que contribuye a una investigación sólida y fundamentada.

RESULTADOS

Programa para calcular la dimensión fractal

- *Título y descripción*

Programa en Python para el cálculo de la dimensión fractal: FractalDT. Este programa fue desarrollado de forma específica para calcular la dimensión fractal de los países latinoamericanos en el contexto de la investigación sobre la relación entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH en los países se-

ñalados. El programa, creación de los autores, denominado FractalDT, se desarrolló utilizando el lenguaje de programación Python y utiliza las imágenes de los países, las mismas que han sido procesadas a partir de mapas satelitales obtenidos de los institutos geográficos de cada país.

El programa fue desarrollado en Python (v. 3.8) utilizando las siguientes bibliotecas adicionales: NumPy, Matplotlib y Scikit-image. Estas bibliotecas se utilizaron para realizar operaciones matemáticas, visualizar imágenes y realizar el procesamiento de las imágenes satelitales necesarias para el cálculo de la dimensión fractal.

- *Aplicación del programa*

Para utilizar eficazmente el programa diseñado para calcular la dimensión fractal de las imágenes satelitales de los países de interés en América Latina, es fundamental seguir un conjunto de pasos meticulosos que garantizarán resultados precisos y significativos. A continuación, se detalla ampliamente cada uno de estos pasos:

Paso 1: Preparación de los Datos de Entrada

Antes de iniciar el proceso, el primer paso es la preparación de los datos de entrada. Esto implica descargar las imágenes satelitales de los países de interés desde fuentes confiables y asegurarse de que estas imágenes estén almacenadas en una ubicación específica. Además, es esencial verificar que las imágenes estén en un

formato compatible con el programa, como jpeg o png. La elección de imágenes de alta calidad y resolución es crucial, ya que influye en la precisión de los resultados finales.

Paso 2: Ejecución del Programa

Una vez que se han preparado los datos de entrada, se procede a la ejecución del programa. Para ello, se debe contar con un entorno de Python que sea compatible con las bibliotecas requeridas, que generalmente incluyen NumPy, Matplotlib y Scikit-image. Es importante asegurarse de que estas bibliotecas estén correctamente instaladas y configuradas en el entorno de Python para garantizar un funcionamiento sin problemas del programa.

Paso 3: Procesamiento de las Imágenes

El corazón de este proceso reside en el paso 3, que implica el procesamiento de las imágenes para calcular la dimensión fractal. En esta etapa, se utilizan las funciones específicas del programa para llevar a cabo diversas tareas, como la segmentación de las imágenes, la extracción de características relevantes y la realización de cálculos matemáticos precisos. La segmentación es esencial para identificar regiones de interés dentro de las imágenes, lo que facilita el análisis fractal.

El proceso de extracción de características implica la identificación de patrones y estructuras relevantes en las imágenes, que luego se utilizan para calcular la dimensión fractal. Esto puede

incluir la detección de bordes, la identificación de áreas de interés o cualquier otro aspecto relevante para la evaluación de la complejidad fractal de las regiones.

En esta etapa, el programa emplea técnicas matemáticas avanzadas para calcular la dimensión fractal de cada región de interés en las imágenes. Estos cálculos se basan en principios fundamentales de geometría fractal y proporcionan mediciones cuantitativas que reflejan la complejidad y la organización de las regiones analizadas.

El proceso de utilización del programa para calcular la dimensión fractal de las imágenes satelitales de los países de América Latina es un proceso riguroso que abarca desde la preparación de los datos de entrada hasta el procesamiento de las imágenes y los cálculos matemáticos. Cada paso desempeña un papel crucial en la obtención de resultados precisos y significativos, lo que a su vez contribuye a una comprensión más profunda de la complejidad espacial de los sistemas socioeconómicos en la región. El programa calcula la dimensión fractal de una imagen utilizando el método de la “dimensión fractal de la caja” (box-counting fractal dimensión).

A continuación, se explica cómo funciona el método paso a paso:

- *Convertir la imagen a una imagen binaria:* La imagen original se convierte en una imagen binaria, donde los píxeles que cumplen cierto criterio se establecen en 1 (valor verdadero) y los demás en 0 (valor falso). Esto simplifica el cálculo del borde de la imagen.

- *Encontrar los bordes de la imagen:* Se utiliza la función `find_contours` de la biblioteca `measure` para encontrar los bordes de la imagen binaria.
- *Calcular el número de cajas en cada nivel de detalle:* Se crea una serie de cuadrículas de cajas sobre la imagen, cada una con un tamaño determinado. El tamaño de las cajas comienza en 1 y se va incrementando de forma exponencial hasta un tamaño máximo basado en el tamaño de la imagen. Para cada tamaño de caja, se cuenta el número de cajas no vacías que contienen al menos un píxel activo.
- *Calcular la dimensión fractal:* Se ajusta una línea recta en una gráfica logarítmica, donde el eje x representa el tamaño de las cajas y el eje y representa el número de cajas no vacías.

La pendiente de esta línea recta es igual a la dimensión fractal inversa (la pendiente negativa). El programa devuelve la dimensión fractal calculada.

Paso 4: Obtención de los resultados

Los resultados del cálculo de la dimensión fractal se pueden mostrar en pantalla, guardar en un archivo o utilizar en análisis posteriores.

Al ejecutar el programa y procesadas las imágenes a partir de AUTOCAD®, se obtienen las respectivas dimensiones fractales de los países de Latinoamérica ([Figura 1](#)).

Los resultados obtenidos en relación con la densidad poblacional de los países latinoamericanos con la dimensión fractal se muestran a continuación en la [Tabla 2](#):

[FIGURA 1.](#) *Dimensión fractal de Ecuador.*



Dimensión fractal: 1.955

Fuente: Elaborado por los investigadores.

TABLA 2. *Dimensión fractal de los países de Latinoamérica.*

País	Dimensión Fractal
Argentina	1.939
Bolivia	1.843
Brasil	1.864
Chile	1.961
Colombia	1.889
Ecuador	1.955
Paraguay	1.850
Perú	1.893
Uruguay	1.818
Venezuela	1.870

Fuente: Elaborado por los investigadores.

La **Tabla 2** muestra los resultados de la aplicación del programa FractalDT, Los resultados obtenidos por el programa “FractalDT” muestran las dimensiones fractales estimadas para cada uno de los países de América Latina analizados. Estos valores de dimensión fractal son números cercanos a 2, lo que sugiere que las estructuras o conjuntos de datos en estos países tienen una complejidad intermedia.

Una dimensión fractal cercana a 2 indica que los objetos o patrones en el país tienen características intermedias entre un objeto completamente unidimensional (dimensión 1) y un objeto bidimensional (dimensión 2). En términos generales, una dimensión fractal más cercana a 1 se asocia con estructuras lineales o fractales altamente irregulares, mientras que una dimensión más cercana a 2 indica que los objetos tienen una

forma más compacta o menos irregular ([Bermejo, 2017](#)).

Es importante tener en cuenta que la interpretación precisa de los resultados dependerá de la naturaleza específica de los datos y del contexto de la investigación. Sin embargo, en general, estos resultados sugieren que los países de América Latina estudiados tienen características urbanas o estructuras geográficas con cierto grado de complejidad intermedia desde el punto de vista fractal ([Padilla-Villanueva, 2022](#)).

Análisis estadístico

La interacción entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el IDH en países de América Latina es un área de gran relevancia dentro de la investigación en campos urbanos y geográficos. La dimensión fractal, un concepto que ha ganado prominencia en estos ámbitos ([Aresta, 2021](#)), constituye una métrica esencial para describir la complejidad y la estructura geométrica de patrones y objetos, ofreciendo así una ventana hacia la organización espacial de áreas urbanas y rurales.

En paralelo, la densidad poblacional y el IDH emergen como indicadores fundamentales para evaluar el nivel de urbanización y el bienestar socioeconómico de una región. Mientras la densidad poblacional refleja la concentración de personas en un área dada, el IDH combina diversos indicadores, como educación, esperanza de vida y nivel de vida, para brindar una visión integral del desarrollo humano.

El enfoque de esta investigación radica en utilizar el coeficiente de correlación de Pearson, una herramienta estadística sólida, para examinar sistemáticamente la posible relación entre estas variables en el contexto latinoamericano. A través de este análisis, se busca descubrir patrones y tendencias que puedan arrojar luz sobre cómo la complejidad fractal de las áreas geográficas se entrelaza con la densidad poblacional y, en última instancia, con el nivel de desarrollo humano.

Este estudio, al profundizar en estas relaciones, tiene el potencial de enriquecer significativamente nuestra comprensión de los sistemas socioeconómicos y urbanos en América Latina. Además, ofrece la posibilidad de identificar áreas geográficas específicas donde la complejidad fractal podría estar correlacionada positiva o negativamente con la densidad poblacional y el IDH, lo que podría tener implicaciones importantes para la planificación urbana y el desarrollo regional.

En resumen, esta investigación busca desentrañar el tejido complejo que une la dimensión fractal, la densidad poblacional y el desarrollo humano en países latinoamericanos, utilizando rigurosos métodos estadísticos para examinar estas relaciones. A través de este enfoque, se aspira a contribuir al conocimiento en el campo de la geografía urbana y el desarrollo regional, proporcionando una base sólida para futuras estrategias de planificación y políticas destinadas a promover un desarrollo sostenible y equitativo en América Latina.

La elección del coeficiente de correlación de Pearson como herramienta estadística clave en esta investigación se basa en su idoneidad para analizar la relación entre variables continuas, como la dimensión fractal, la densidad poblacional y el índice de desarrollo humano en el contexto de países latinoamericanos.

Primero, es fundamental comprender que el coeficiente de correlación de Pearson evalúa no solo la existencia de una relación entre dos variables, sino también la dirección y la fuerza de dicha relación (Caballero et al., 2019). Esto significa que no solo se determina si existe algún tipo de relación, sino también si esta es positiva o negativa y en qué medida es fuerte o débil. Dado que la relación entre estas variables puede ser compleja y variada, es crucial contar con una herramienta que permita un análisis completo.

Además, el coeficiente de Pearson es particularmente relevante cuando se busca identificar relaciones lineales entre variables. Aunque las relaciones pueden no ser estrictamente lineales en la realidad, este coeficiente es capaz de capturar asociaciones lineales significativas, lo que proporciona información valiosa sobre la posible dependencia entre las variables. En muchos contextos, como el estudio de sistemas urbanos y socioeconómicos, es razonable asumir que existen relaciones lineales en algunos aspectos antes de explorar relaciones no lineales más complejas.

El coeficiente de Pearson también es ampliamente utilizado en investigaciones y análisis estadísticos, lo que facilita la comparación y el contraste de resultados con otros estudios y

datos previamente publicados. Esto aumenta la robustez y la capacidad de generalización de los hallazgos.

La elección del coeficiente de correlación de Pearson se justifica por su capacidad para evaluar de manera integral y cuantitativa la relación entre variables continuas, su habilidad para determinar la dirección y la fuerza de dicha relación, y su idoneidad para identificar relaciones lineales, lo que es relevante en el análisis de sistemas socioeconómicos y urbanos (Tabla 3). Esta elección proporciona una base sólida para comprender los patrones y comportamientos que puedan surgir de la interacción entre la dimensión fractal, la densidad poblacional y el índice de desarrollo humano en países latinoamericanos.

TABLA 3. Correlación con coeficiente de Pearson.

Dimensión fractal- densidad poblacional	Dimensión fractal - Índice de desarrollo humano
0.52	0.47

Fuente: Elaborado por los investigadores.

- *Correlación entre dimensión fractal y densidad poblacional (0.52)*

El coeficiente de correlación de 0.52 entre la dimensión fractal y la densidad poblacional indica una correlación moderadamente positiva. Esto sugiere que, en general, a medida que aumenta la densidad poblacional en los países latinoamericanos, es probable que también aumente la dimensión fractal de las estructuras urbanas o patrones

geográficos. Específicamente, una mayor densidad poblacional podría estar relacionada con una mayor complejidad y organización espacial en las áreas urbanas, lo que podría deberse a la planificación y la aglomeración de actividades humanas.

- *Correlación entre dimensión fractal e Índice de Desarrollo Humano (0.47)*

La correlación de 0.47 entre la dimensión fractal y el índice de desarrollo humano sugiere una relación positiva moderada entre estas variables. Esto podría indicar que a medida que aumenta el índice de desarrollo humano en los países de la muestra, también podría aumentar la dimensión fractal de sus estructuras y patrones. Específicamente, un mayor desarrollo humano podría estar vinculado a una mayor organización y complejidad espacial en las áreas urbanas, ya que el desarrollo suele estar asociado con una mayor infraestructura y planificación urbana.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El mayor valor de dimensión fractal: Chile (Dimensión fractal: 1.961), una dimensión fractal cercana a 2 sugiere que Chile tiene patrones o estructuras con una mayor compacidad y regularidad en comparación con otros países de la muestra (Nai et al., 2021). Esto puede indicar que las características geográficas o urbanas en Chile presentan una mayor organización espacial y menos complejidad fractal en comparación con otros países (Mariano & Mallmann, 2021).

Menor valor de dimensión fractal: Uruguay (Dimensión fractal: 1.818), tiene el menor valor de dimensión fractal en la muestra. Una dimensión fractal cercana a 1.818 indica que el país puede tener patrones o estructuras más fractales y menos organizadas en comparación con otros países de América Latina (Flores, 2020). Por lo tanto, se pueden encontrar áreas más dispersas y con mayor irregularidad en su configuración espacial.

Datos significativos deducidos

- *Diversidad de estructuras urbanas*

Los resultados sugieren que los países de América Latina exhiben una diversidad en sus estructuras urbanas o patrones geográficos. Algunos países tienen áreas más compactas y organizadas, mientras que otros tienen áreas más dispersas y fractales. Esta variabilidad puede estar influenciada por factores históricos, geográficos, políticos y sociales (González, 2019).

- *Desarrollo y planificación urbana*

La dimensión fractal puede ofrecer información sobre la complejidad y la organización de las ciudades (Díaz-Lanchas, 2020). Los países con una dimensión fractal más alta pueden tener una planificación urbana más efectiva y un mayor grado de orden en sus ciudades, mientras que los países con una dimensión fractal más baja pueden enfrentar desafíos en la organización y el desarrollo de sus áreas urbanas.

- *Distribución de la población*

La dimensión fractal también puede estar relacionada con la distribución de la población en los países (Molina-León, 2021). Un valor de dimensión fractal más alto podría indicar una concentración más significativa de población en áreas específicas, mientras que un valor más bajo podría sugerir una distribución más dispersa y equitativa de la población.

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de la dimensión fractal sugieren que esta dimensión, la densidad poblacional y el IDH están interrelacionados en los países de América Latina. Estos hallazgos contribuyen a una comprensión más amplia de los factores que influyen en el desarrollo humano en la región, aunque se necesita más investigación para obtener conclusiones definitivas.

Los datos la densidad poblacional y el desarrollo humano entre los países latinoamericanos analizados revelan cifras significativas, estos datos pueden ser útiles para comprender las disparidades socioeconómicas y demográficas en la región y pueden servir como punto de partida para futuros análisis comparativos y políticas de desarrollo.

El programa FractalDT, estima la dimensión fractal de la imagen al contar el número de cajas no vacías en diferentes niveles de detalle de la imagen y ajustar una línea recta en una gráfica logarítmica para obtener la pendiente, que

representa la dimensión fractal. El método de la dimensión fractal de la caja es una técnica comúnmente utilizada para caracterizar la complejidad y la estructura de objetos y conjuntos en el contexto de la geometría fractal.

Los resultados sugieren que la dimensión fractal está relacionada positivamente con la densidad poblacional y el IDH en países latinoamericanos. Estos hallazgos proporcionan una perspectiva valiosa para comprender la complejidad de las estructuras urbanas y geográficas en la región y pueden tener implicaciones en la planificación y el desarrollo urbano sostenible. Sin embargo, se necesitarían estudios adicionales y análisis multivariable para comprender completamente los factores que influyen en estas relaciones complejas y cómo pueden afectar el desarrollo de los países en Latinoamérica.

REFERENCIAS

- Aresta, M. (2019). *Arquitecturas biológicas: El amor por la Forma (Philomorphus)*. Nobuko.
- Arriola, L. (2020). Paisaje visual en las barrancas urbanas de Cuernavaca, Morelos. Cuantificación de la visibilidad y percepción ciudadana [*Tesis de Maestría*, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. RIAA Principal. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2118>
- Bharathi, N., Malghan, D., Mishra, S. & Rahman, A. (2021) Fractal urbanism: City size and residential segregation in India. *World Development*, 141, 1–42. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105397>
- Bermejo, G. (2017). Análisis geométrico y fractal de fracturas geológicas en los campos geotérmicos del Lago de Cuitzeo [*Tesis Magistral*, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. Repositorio Institucional de la UMSNH. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4406
- Buscema, M., Ferilli, G., Gustafsson, C., Masini, G. & Sacco, P. (2022). A nonlinear, data-driven, ANNs-based approach to culture-led development policies in rural areas: The case of Gjakove and Peć districts, Western Kosovo. *Chaos, Solitons & Fractals*, 162, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112439>
- Bustillos, J. (2022). Perspectivas sísmicas en México usando machine learning [*Tesis de licenciatura*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/18255>
- Caballero, H., Muñoz, V., Ramos-Corchado, M., Morales-Reyes, A. & Romero-Huertas, M. (2019). A review of steganography techniques for digital information transmission for secure channels with digital images. *IEEE Latin America Transactions*, 17(11), 1831–1842. <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8986421>
- Calderón, N. (2017). Diseño de un modelo de gestión del caos y complejidad para procesos de adaptación al cambio climático, Región Tacna, 2015. [*Tesis doctorado*, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/2500>

- CEPAL. (2023). *Segundo Informe de Ejecución del Programa Bienal de Actividades de Cooperación Regional e Internacional 2022-2023 de la Conferencia Estadística de las Américas de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. ONU. <https://hdl.handle.net/11362/48840>
- Chen, S. & Zhang, T-J. (2019). Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI) by fractal universe. *Results in Physics*, 15(3), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102548>
- David, S., Machado, J., Inácio, C. & Valentim, C. (2020). A combined measure to differentiate EEG signals using fractal dimension and MFDFA-Hurst. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 84, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105170>
- Díaz-Lanchas, J. (2020). Ciudades y crecimiento económico: Una relación convulsa y prometedora. *Panorama Social*, (32), 23–32. <https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2021/02/Jorge-Diaz-Lanchas.pdf>
- Flores, M. (2020). Diseño sistematizado y construcción de herramental y mapas primarios de la microtextura palmar de la Lithobates vibicarius y la Agalychnis spurrelli [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI-UCR. <https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/17677>
- Förster, J. y López, I. (2022). Neurodesarrollo humano: un proceso de cambio continuo de un sistema abierto y sensible al contexto. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 33(4), 338–346. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2022.06.001>
- Gilarranz, C. (2019). Arquitectura homeostática basada en la geometría fractal [Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/55997/>
- González, E. (2019). Humedales de la llanura costera de Ajó-Samborombón: identificación y caracterización mediante herentas de tele-detección [Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional CONICET Digital. <http://hdl.handle.net/11336/82786>
- Jordán, R., Rifo, L. y Prado, A. (Coords.), (2017). *Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe. Dinámicas y desafíos para el cambio estructural*. ONU. <https://hdl.handle.net/11362/42141>
- Kavuran, G., Gökhan, Ş. & Yeroğlu, C. (2022). COVID-19 and human development: An approach for classification of HDI with deep CNN. *Biomedical Signal Processing and Control*, 81, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104499>
- Liu, J., Jin, X., Xu, W. & Zhou, Y. (2022). Evolution of cultivated land fragmentation and its driving mechanism in rural development: A case study of Jiangsu Province. *Journal of Rural Studies*, 91, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.02.011>
- Mariano, P. & Mallmann, G. (2021). Parametric process of a box-counting model for evaluation of fractal compositions. *arq. urb*, (31), 114–124. <https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi31.517>

- Martínez, F., Sepúlveda, B. & Manríquez, H. (2023). Fractal Organization of Chilean Cities: Observations from a Developing Country. *Land*, 12(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/land12020296>
- McCaffrey, M. & Boucher, J. (2022). Pedagogy of agency and action, Powers of 10, and fractal entanglement: Radical means for rapid societal transformation toward survivability and justice. *Energy Research & Social Science*, 90, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102668>
- Méndez, R. (2007). El territorio de las nuevas economías metropolitanas. *Eure*, 33(100), 51–67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612007000300004>
- Mendoza, J. y Pérez, C. (2021). Justicia territorial y segregación urbana en el proyecto especial ciudad Pachacutec, Sector E, distrito de Ventanilla, 2000–2021. [*Tesis título profesional*, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/75391>
- Molina-León, F. (2020). Arquitectura experimental. Aportaciones experimentales pioneras del trabajo con modelos físicos estructurales 1961-1975 [*Tesis doctoral*, Universidad de Navarra]. DADUN. <https://dadun.unav.edu/handle/10171/60677>
- Nai, G., Martelli, C., Medina, D., de Oliveira, M., Caldeira, I., Henriques, B., Portelinha, M., Eller, L. & Marques, M. (2021). Fractal dimension analysis: A new tool for analyzing colony-forming units. *MethodsX*, 8, 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2021.101228>
- Padilla-Villanueva, J. (2022). Dinámica espacio-temporal de la población del mosquito *Aedes aegypti* (L.) en la zona del Caño Martín Peña en San Juan de Puerto Rico durante los años epidemiológicos 2018–2019; Repercusiones a la salud para los residentes de las comunidades aledañas [*Disertación doctoral*, Universidad de Puerto Rico]. Repositorio institucional. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/A6QR4>
- Paris, M. (2020). Alex Krieger, City on a Hill: Urban Idealism in America from the Puritans to the Present, Cambridge (MA), Belknap Press of Harvard University Press, 2019, 464 pp., ISBN: 9780674987999. *Ciudades*, (23), 239–244. <https://doi.org/10.24197/ciudades.23.2020.239-244>
- Diego Marcelo Tipán Renjifo.** Maestría en Administración Educativa. Licenciado en Ciencias de la Educación. Universidad Indoamérica (Ecuador). <https://orcid.org/0000-0002-4463-2013>
- Carmen Mariela Vaca Lovato.** Investigadora independiente (Ecuador). <https://orcid.org/0009-0006-1260-265X>
- Nancy de Lourdes Jordán Buenaño.** Maestría en Docencia Matemática. Licenciado en Ciencias de la Educación. Universidad Indoamérica (Ecuador). <https://orcid.org/0000-0002-1807-4839>