

# Análisis de problemáticas urbanas a escala continental basado en datos abiertos: espacios verdes, forma urbana y sostenibilidad futura de las ciudades en África

*Continental-scale Analysis of Urban Issues Based on Open Data: Green Spaces, Urban Form and the Future Sustainability of Cities in Africa*

*Análise em escala continental de questões urbanas com base em dados abertos: espaços verdes, forma urbana e a futura sustentabilidade das cidades na África*

Jorge Eduardo Patiño Quinchía\*  
Rafael Prieto-Curiel\*\*  
Brilé Anderson\*\*\*

Recibido: 16 de diciembre de 2022

Aprobado: 10 de marzo de 2023

<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.12775>

Para citar este artículo

Patiño, J., Prieto-Curiel, R., & Anderson, B. (2023). Análisis de problemáticas urbanas a escala continental basado en datos abiertos: espacios verdes, forma urbana y sostenibilidad futura de las ciudades en África. *Territorios*, (49-Especial), 1-24. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.12775>

\* Club del Sahel y África Occidental, OECD, París, Francia. Correo electrónico: [jorge.patino@oecd.org](mailto:jorge.patino@oecd.org). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1591-9138>

\*\* Complexity Science Hub, Vienna, Austria. Correo electrónico: [prieto-curiel@csh.ac.at](mailto:prieto-curiel@csh.ac.at). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0738-2633>

\*\*\* Club del Sahel y África Occidental, OECD, París, Francia. Correo electrónico: [brile.anderson@oecd.org](mailto:brile.anderson@oecd.org)

**Palabras clave**

*Espacios verdes urbanos; ciudad; resiliencia; sostenibilidad; servicios ecosistémicos; soluciones basadas en naturaleza; África.*

**Keywords**

*Urban green spaces; city; resilience; sustainability; ecosystem services; nature-based solutions; Africa.*

**Palavras-chave**

*Espaços verdes urbanos; cidade; resiliência; sustentabilidade; serviços ecossistêmicos; soluções baseadas na natureza; África.*

**RESUMEN**

Las próximas décadas serán de rápida urbanización y estrés climático en las ciudades africanas. Los espacios verdes pueden aumentar la resiliencia de las ciudades frente a las olas de calor, las inundaciones, los deslizamientos de tierra e incluso la erosión costera, además de mejorar la sostenibilidad al reparar la calidad del aire, proteger la biodiversidad y absorber carbono. Sin embargo, datos cuantitativos sobre la forma urbana, la disponibilidad de espacios verdes y la contaminación del aire son muy escasos y de difícil acceso para ciudades en África. En este trabajo usamos datos geoespaciales abiertos para analizar cuantitativamente las relaciones entre la forma urbana, la presencia de espacios verdes y la calidad del aire. Los resultados del análisis indican que la presencia de espacios verdes se relaciona con mejor calidad del aire, pero que deben estar acompañados de otras políticas para que su presencia sea realmente efectiva.

**ABSTRACT**

The next few decades will bring rapid urbanization and climatic stress to African cities. Green spaces can increase the resilience of cities against heat waves, floods, landslides, and even coastal erosion, as well as improve sustainability by improving air quality, protecting biodiversity, and absorbing carbon. However, quantitative data on urban form, the availability of green spaces, and air pollution are very scarce and difficult to access for African cities. In this work, we use open geospatial data to quantitatively analyze the relationships between urban form, the presence of green spaces, and air quality. The results of this analysis indicate that the presence of green spaces is related to better air quality, but that they must be accompanied by other policies for their presence to be truly effective.

**RESUMO**

As próximas décadas serão de rápida urbanização e estresse climático nas cidades africanas. Os espaços verdes podem aumentar a resiliência das cidades contra ondas de calor, inundações, deslizamentos de terra e até erosão costeira, além de melhorar a sustentabilidade ao melhorar a qualidade do ar, proteger a biodiversidade e sequestrar carbono. No entanto, os dados quantitativos sobre a forma urbana, a disponibilidade de espaços verdes e a poluição do ar são muito escassos e de difícil acesso para as cidades africanas. Neste trabalho utilizamos dados geoespaciais abertos para analisar quantitativamente as relações entre a forma urbana, a presença de espaços verdes e a qualidade do ar. Os resultados desta análise indicam que a presença de espaços verdes está relacionada com uma melhor qualidade do ar, mas que devem ser acompanhadas de outras políticas para que a sua presença seja verdadeiramente eficaz.

## Introducción

Las ciudades son fundamentales para un futuro sostenible. La forma en que se construyen y crecen las áreas urbanas tendrán implicaciones a largo plazo en el medio ambiente y en la vida de miles de millones de personas en todo el mundo. Las ciudades de África no son la excepción, se están urbanizando a un ritmo muy rápido y lo hacen en circunstancias increíblemente únicas. Colectivamente, 950 millones de personas adicionales vivirán en ciudades africanas para el 2050 en comparación con el 2015, pero a tasas de urbanización mucho más rápidas y con mucho menos recursos económicos que sus contrapartes a nivel mundial (Organization for Economic Co-operation and Development/Sahel and West Africa Club Secretariat [OECD/SWAC], 2020; Page *et al.*, 2020). En medio de esta urbanización, ya notable por sí sola, está el cambio climático, lo que significa que las ciudades deben pasar por esta transición en un momento de estrés climático extremo. Por ejemplo, se prevé que África se caliente 1,5 °C más rápido que el promedio mundial en un escenario futuro de 2 °C (Masson-Delmotte, 2018; Osima *et al.*, 2018). Como resultado, se espera que las ciudades de África occidental sean afectadas por peligrosas olas de calor entre 145 y 196 días al año para la década del 2090 en diferentes escenarios climáticos (Rohat *et al.*, 2019).

¿Cómo pueden las ciudades urbanizarse de manera resiliente y sostenible y, en última instancia, ser habitables? Los espacios verdes urbanos son una herramienta a disposición de las ciudades, que a menudo se pasan por alto y se subestima en la competencia por la tierra al urbanizar (Mensah, 2014). Los espacios verdes brindan servicios ecosistémicos indispensables que aumentan la resiliencia de la ciudad al cambio climático —soluciones basadas en la naturaleza— y fortalecen su sostenibilidad. Su presencia puede atenuar los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos —como olas de calor, fuertes lluvias, marejadas ciclónicas e inundaciones— y los riesgos de aparición lenta —como sequías, erosión del suelo, deslizamientos de tierra—. Entre otros beneficios de los espacios verdes que mejoran la sostenibilidad de las ciudades, están reducir la contaminación del aire y el ruido, secuestrar y almacenar carbono, contribuir a la calidad del agua y a la conservación de la biodiversidad (OCDE, 2021). Estos servicios se reflejan en mejor salud pública: reducción de las tasas de mortalidad por asma en los niños y disminución del estrés por calor entre los ancianos. Además, su presencia está asociada con una mejor cohesión social, mejoría en la salud mental debido a niveles más bajos de estrés y depresión, y una mejor salud física (Hong *et al.*, 2021; Jimenez *et al.*, 2022; Patino *et al.*, 2021; Rigolon *et al.*, 2018; Wood *et al.*, 2017).

territorios  
49-Especial

A pesar de su relevancia para la resiliencia de las ciudades, las relaciones entre forma urbana, presencia de espacios verdes y contaminación, se desconocen en miles de ciudades africanas. El objetivo general de este trabajo es mostrar una alternativa para llenar ese vacío de información con datos abiertos y métodos replicables en muchas áreas urbanas del mundo. Específicamente, se pretende visibilizar fuentes de datos geoespaciales abiertos que permiten estimar algunas de las características físicas más importantes de las áreas urbanas, tales como la presencia de espacios verdes, los niveles de la contaminación del aire, la conectividad de la malla vial, y la distribución espacial de las construcciones que hacen parte del tejido urbano. Este trabajo también pretende divulgar el modelo BASE, un modelo matemático que permite caracterizar cuantitativamente la forma de las manchas urbanas a partir de datos de la distribución y el tamaño de sus edificios. El último objetivo específico de este estudio es mostrar la forma de implementar un análisis cuantitativo para evaluar las variables mencionadas arriba, a fin de responder las dos preguntas de investigación: ¿Existe una relación significativa entre la forma y estructura de las áreas urbanas y la presencia de espacios verdes en su interior? Y ¿Las características de la forma urbana, incluyendo la presencia de espacios verdes, tienen un efecto significativo sobre los niveles estimados de contaminación del aire? Las siguientes

secciones describen las fuentes de datos usadas, la definición de las métricas de forma urbana, los resultados del análisis cuantitativo, y una breve discusión de los mismos.

## Datos

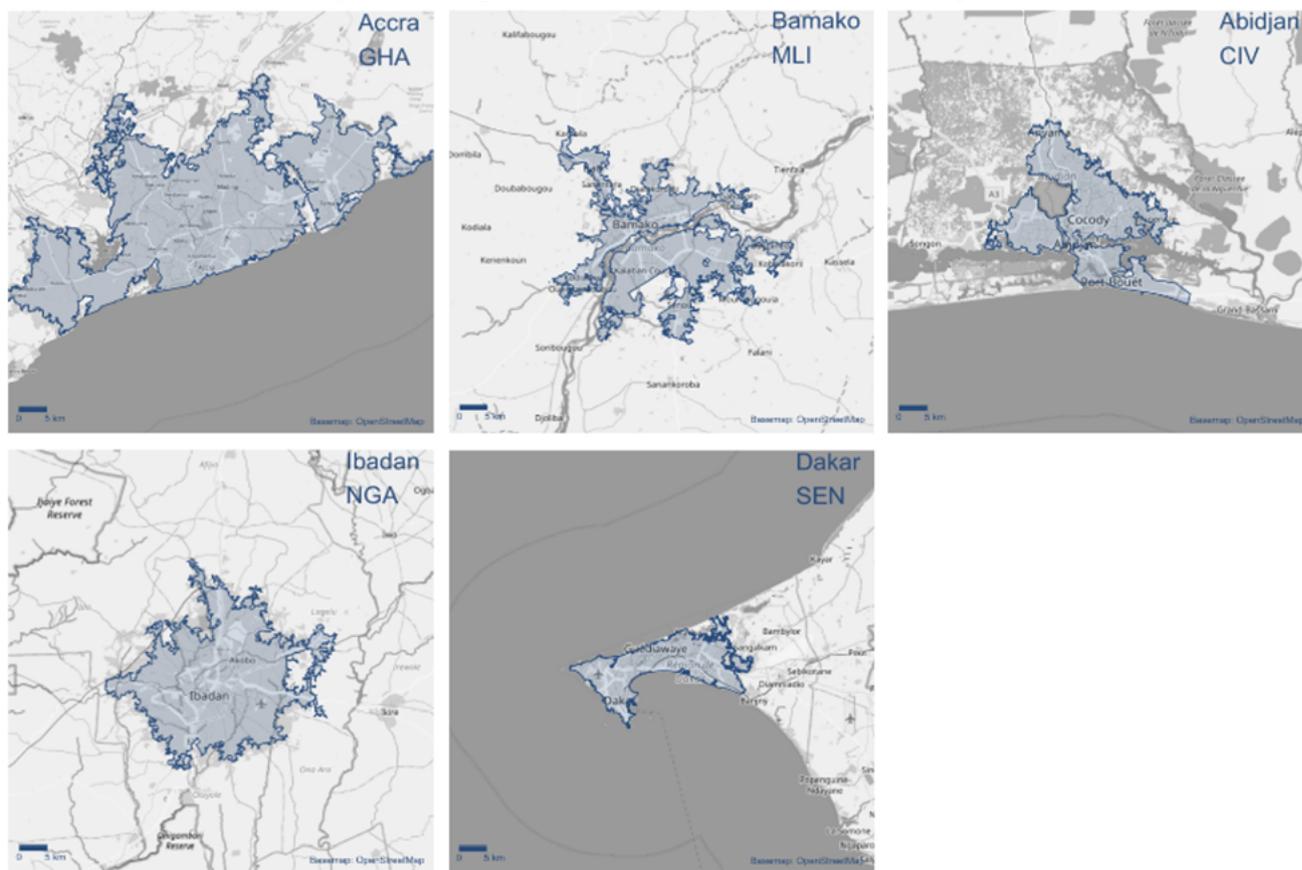
### Delimitación de áreas urbanas

Los límites de las áreas que se consideran urbanas, independientemente de su estatus administrativo, fueron descargados en formato SIG (*shapefile*) de Africapolis (<https://africapolis.org/en/data>). El conjunto de datos Africapolis mapea los límites de las áreas urbanas de África con una definición estandarizada de área urbana basada en criterios espaciales y demográficos: un área construida continua que tiene al menos 10.000 habitantes en el 2015 con menos de 200 metros entre edificios (véase figura 1).

### Presencia de espacios verdes urbanos

La cantidad de espacios verdes urbanos (*UGS fraction*) se calculó con el conjunto de datos ESA WorldCover 2020 de la Agencia Espacial Europea (Zanaga *et al.*, 2021). Este es un mapa global de coberturas del terreno a 10 metros de resolución espacial, elaborado a partir del procesamiento conjunto de las imágenes de radar Sentinel-1 con las imágenes ópticas Sentinel-2 y algoritmos de inteligencia artificial (<https://worldcover2020.esa>).

Figura 1. Ejemplos de límites de áreas urbanas de Africapolis



*Nota.* De izquierda a derecha: Accra (Ghana), Bamako (Malí), Abidjan (Costa de Marfil), Ibadan (Nigeria) y Dakar (Senegal). Todos los mapas están a la misma escala.

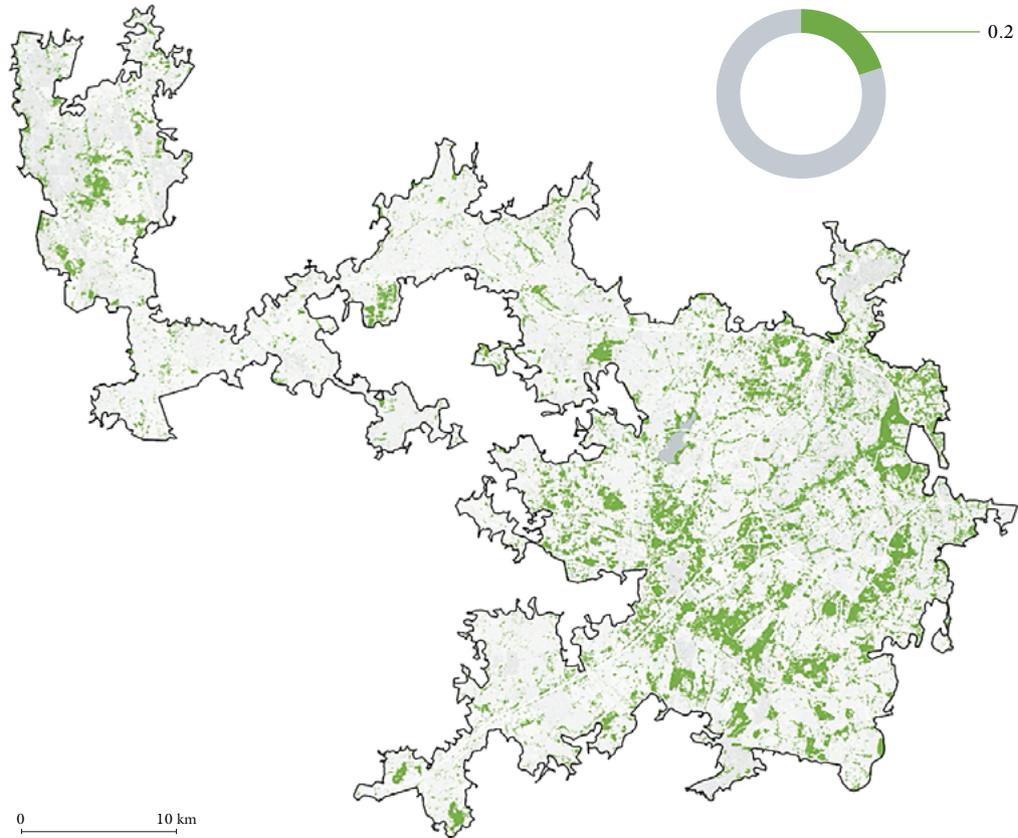
int). Este conjunto de datos clasifica el terreno en 11 tipos diferentes de cobertura, incluyendo áreas con árboles, arbustales, y pastos. La presencia de espacios verdes urbanos se mide como la suma de las áreas que tienen cobertura de vegetación de árboles, arbustos y pastos, dividida por el área total de la ciudad y su valor varía entre 0 y 1 (véase figura 2).

### Contaminación del aire

Los datos precisos de la contaminación del aire exterior de las ciudades africanas son notoriamente difíciles de encontrar, debido a la falta de estaciones de monitoreo. Este análisis utilizó datos del Grupo de Análisis de Composición Atmosférica de la Universidad de Washington

*territorios  
49-Especial*

Figura 2. Fracción del área urbana con espacios verdes en Abuja (Nigeria)



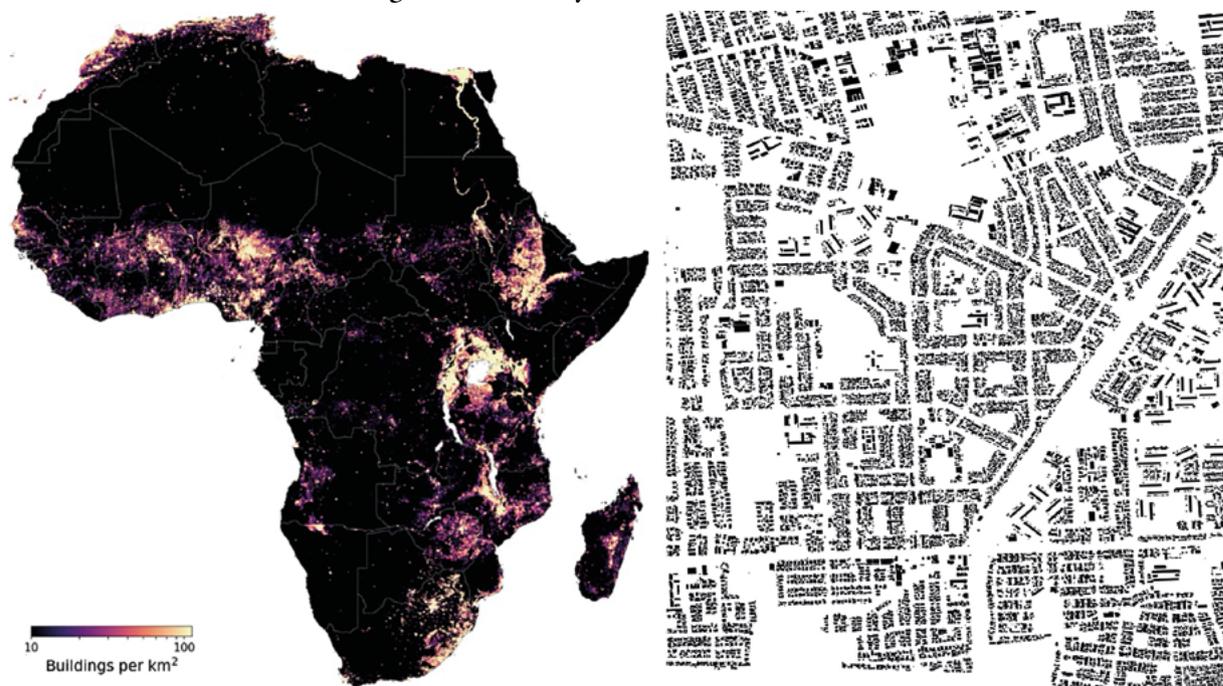
Fuente: elaboración propia con datos extraídos del conjunto de datos World Cover (2020) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

(Van Donkelaar *et al.*, 2021), que produce datos de concentración promedio anual de  $PM_{2.5}$  en formato de malla regular con tamaño de celda de 1 km. En este trabajo, se calcularon los niveles promedio anuales de contaminación del aire exterior en las ciudades estudiadas para el 2019 —antes de la pandemia de COVID-19—, usando el promedio espacial de las celdas ubicadas al interior de cada ciudad.

### Huellas de edificios y forma urbana

La forma urbana se midió con datos de la localización y tamaño de los edificios de la ciudad obtenidos de Google Open Buildings V1 (Sirko *et al.*, 2021, <https://sites.research.google/open-buildings/>). Este conjunto de datos contiene las huellas de los edificios a lo largo del continente, con excepción de algunas regiones

Figura 3. Huellas y densidad de los edificios



Nota. Izquierda: densidad de edificios por  $\text{km}^2$  en África. Derecha: huellas de edificios en el sector Lavender Hill de Ciudad del Cabo (Sudáfrica). Fuente: Izquierda: Tomado de <https://sites.research.google/open-buildings/>; derecha: elaboración propia con datos de Open Buildings v1.

en conflicto por razones de seguridad (figura 3). La localización de los edificios se asignó a cada ciudad por medio de la intersección geográfica entre las huellas de los edificios y el límite urbano. Luego se construyeron las métricas de forma urbana a partir de la información de localización y tamaño de la huella de los edificios (véase sección 3.1).

### Métricas de mallas viales

En este trabajo se usaron las redes viales de OpenStreetMap y los límites de las

ciudades de Africapolis de cada ciudad para extraer descriptores de malla vial para el análisis, usando la librería de Python OSMmx (Boeing, 2017). *Average node degree* o grado de conectividad promedio, el cual mide el promedio del número de calles que se conectan en cada intersección de la malla vial. La densidad de intersecciones se calcula como el número total de intersecciones viales dentro de la ciudad, dividido por el área de la ciudad en  $\text{km}^2$ ; y *Buildings per node* o número de edificios por cada nodo de la malla vial, se obtiene de la división del número total de

territorios  
49-Especial

7

edificios localizados dentro de la ciudad por el número de nodos de su malla vial.

### Controles geográficos

Este análisis incluye una serie de controles de geografía física y política. Los últimos corresponden a las grandes regiones de África, con referencia a la región central. Son variables *dummy* que dan cuenta de la localización de una ciudad dentro de una de las cuatro regiones restantes: norte, sur, oeste y este. También se incluyen variables climáticas obtenidas de las variables bioclimáticas de *WorldClim Historical Climate Data*, version 2.1 para 1970-2000 (WorldClim, 2020), para las cuales se calculó el promedio especial dentro de los límites de la ciudad (temperatura anual máxima en grados °C y precipitación anual en mm). Así mismo, se incluyen variables topográficas calculadas con el modelo de elevaciones NASADEM (NASA JPL, 2020): la elevación promedio de la ciudad (*average elevation*), la diferencia máxima en elevación (*difference in elevation*), y la pendiente promedio del terreno dentro de la ciudad (*average slope*). Por último, se calculó la distancia desde la ciudad hasta la línea costera (de un río, lago o mar) más cercano (*distance to coast*).

## Métodos

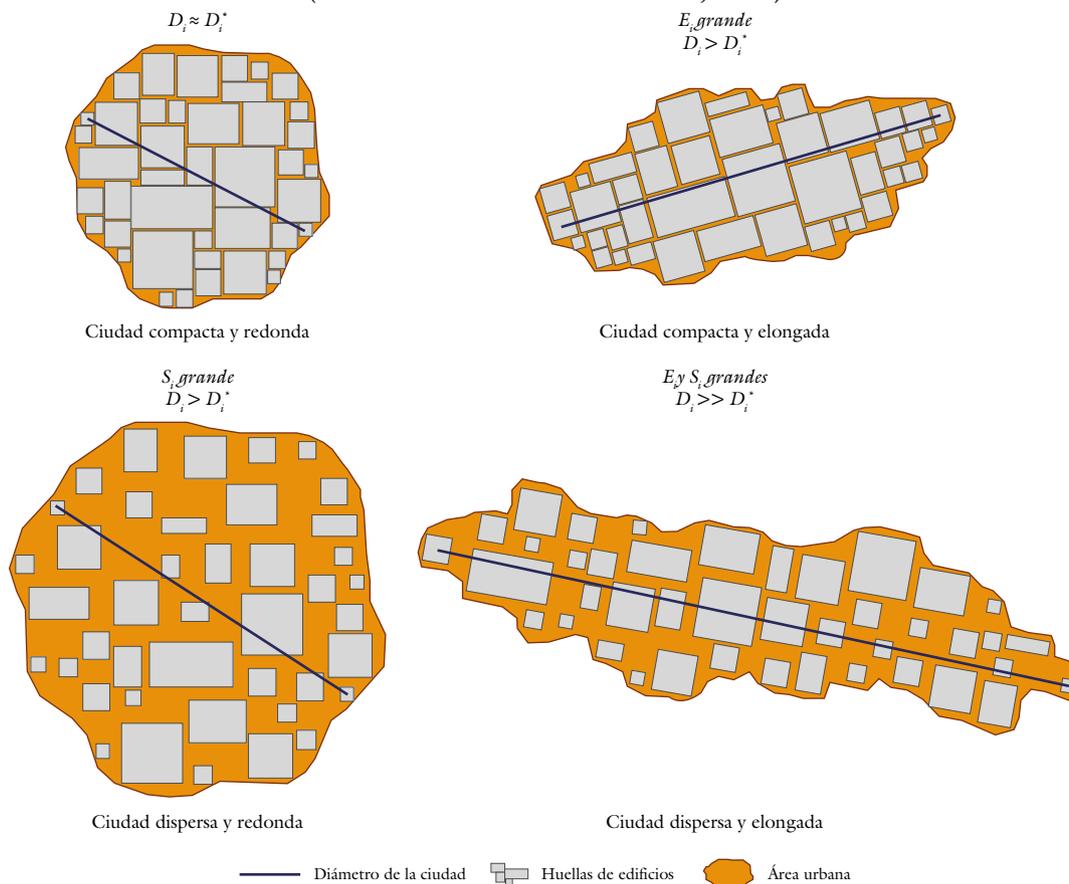
### Construcción de métricas de forma urbana, el modelo BASE

La forma urbana de las ciudades se aproximó a través de indicadores de dispersión (*sprawl*), elongación y policentrismo, entre otros; calculados a partir de la distribución espacial de los edificios dentro de la ciudad usando el modelo BASE (Prieto-Curiel *et al.*, 2023). El modelo BASE descompone la distancia promedio entre dos edificios dentro de una ciudad usando la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{128}{45\pi} \sqrt{B_i A_i S_i E_i} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde  $B_i$  es el número de edificios y  $A_i$  es el área promedio de los edificios.  $S_i$  es el índice de dispersión (*sprawl*), que corresponde al espacio entre edificios (valores bajos corresponden a una ciudad compacta).  $E_i$  es el índice de elongación de la ciudad (valores bajos corresponden a una forma circular y valores altos indican una forma alargada en una dirección en particular). Los índices  $S_i$  y  $E_i$  son comparables para ciudades de diferentes tamaños, ya que tienen en cuenta la distancia máxima entre dos edificios en la ciudad (figura 4).

**Figura 4. Distancias entre edificios en el modelo BASE  
(modificada de Prieto-Curiel *et al.*, 2023)**



*Nota.* Las cuatro representaciones contienen exactamente las mismas huellas de edificios.  $D_i$  distancia máxima real entre dos edificios,  $D_i^*$  es el diámetro de un círculo cuya área equivale a la suma de las áreas de los edificios de la misma ciudad.

### ***Elongación***

La medida de elongación mide qué tanto se aparta la forma urbana de un círculo perfecto —que es la forma más compacta posible (Angel *et al.*, 2018)—. La elongación corresponde a la relación entre la

distancia máxima observada entre edificios y el radio mínimo posible de la ciudad, es decir, si esta fuera un círculo en el que su área equivale a la suma de las áreas de sus edificios. La elongación se define como:

*territorios*  
49-Especial

$$E_i = \frac{M_i \sqrt{\pi}}{2\sqrt{B_i A_i}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde  $M_i$  es el diámetro de la ciudad, que corresponde a la distancia máxima entre dos edificios, y  $2\sqrt{B_i A_i} / \pi$  es el diámetro más pequeño posible de un círculo con área  $B_i A_i$ . Valores altos corresponden a formas muy elongadas y valores bajos a formas más redondas. La figura 5 muestra ejemplos de diferentes valores de elongación para tres ciudades con poblaciones similares. Entre estas, la ciudad de Kaduna (NGA) es la más similar a un círculo (elongación = 3,7), mientras que Aba (NGA) registra un valor mucho más alto (9,4) y muestra elongación en sentido norte-sur y la ciudad de Kigali (RWA) registra un valor incluso más alto (15,0) que

corresponde con una forma urbana muy elongada en sentido noroeste-suroriente.

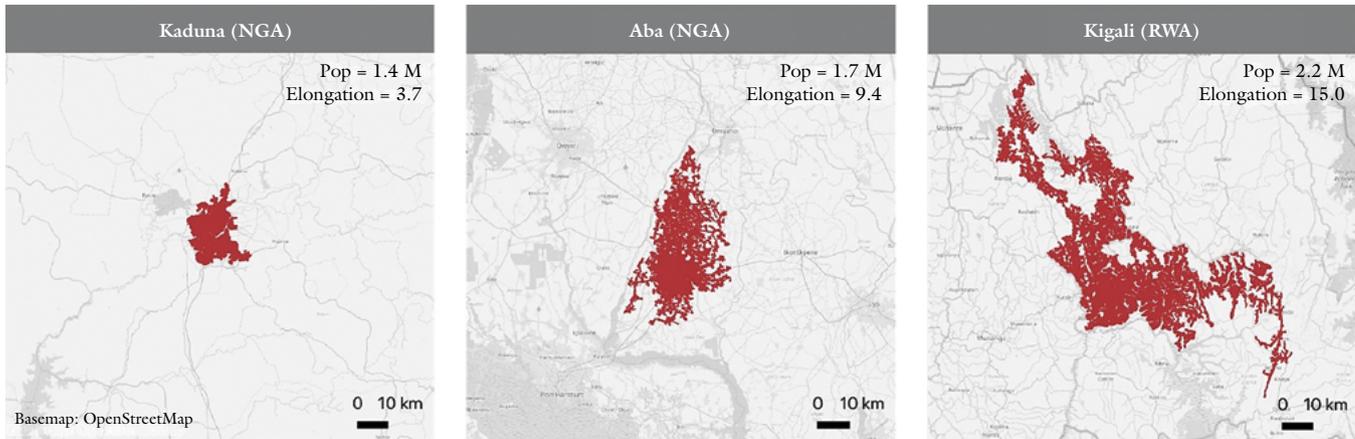
### Dispersión (Sprawl)

La dispersión de una ciudad se define como todo lo demás que incrementa la distancia entre los edificios aparte del número de edificios, su área promedio y la elongación de la ciudad. Despejando  $S_i$  de las ecuaciones 1 y 2, tenemos:

$$S_i = \frac{45^2 \pi^{3/2} D_i^2}{2^{13} M_i \sqrt{B_i A_i}} = \gamma \frac{D_i^2}{M_i \sqrt{B_i A_i}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

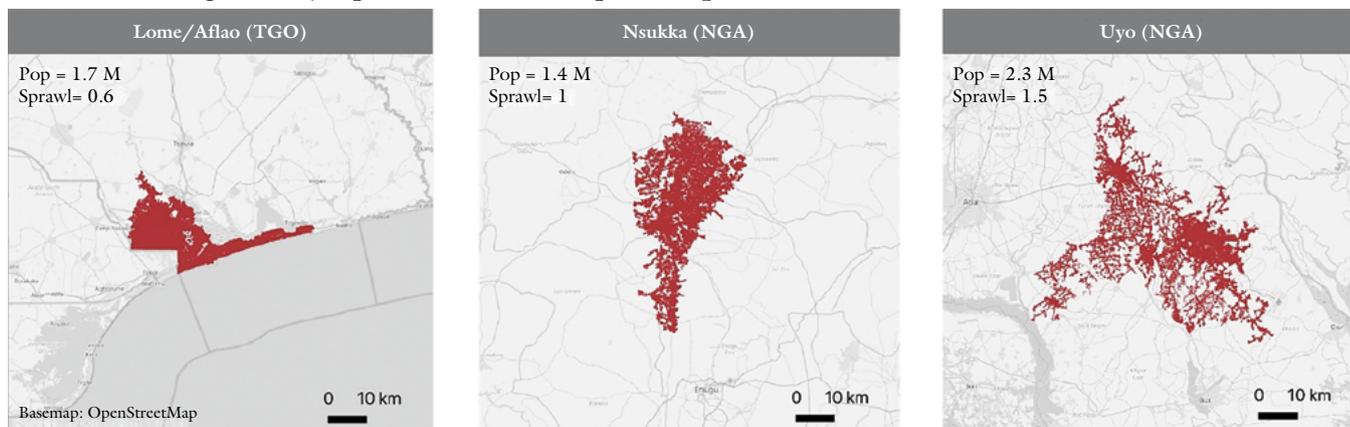
Donde  $\gamma = 45^2 \pi^{2/3} / 2^{13} \approx 1.38$ . Valores altos de esta medida indican una dispersión (*sprawl*) muy alta, entre los edificios (ver los dos ejemplos de la mitad inferior en la figura 4), mientras que valores bajos

Figura 5. Ejemplos de elongación en tres ciudades africanas



Nota. Todos los mapas están a la misma escala.

Figura 6. Ejemplos de valores de dispersión (*sprawl*) en tres ciudades del oeste de África



Nota. Todos los mapas están a la misma escala.

indican una forma urbana más compacta (Prieto-Curiel *et al.*, 2023). La figura 6 muestra ejemplos de ciudades con tamaños similares, pero con valores de dispersión muy diferentes.

### *Métricas de forma urbana complementarias*

#### *Policentrismo*

La medida de policentrismo es un índice que mide el número de centros de alta densidad de huellas de edificios en la ciudad. Este índice se basa en una estimación de densidad en kernel de la intensidad del número de edificios y su área construida por unidad de área (Prieto-Curiel *et al.*, 2023). La densidad en kernel se define como:

$$k(x) = \sum_{j=1}^n w_j f(d_{x,j}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde  $n$  es el número de edificios,  $w_j$  son los pesos ponderados de cada edificio (su área) y  $d_{x,j}$  es la distancia entre el punto  $x$  y el centro del edificio, y  $f$  es una función decreciente, conocida como el *kernel de suavizado*, que en este caso es una función Gaussiana. A partir de esta superficie de densidad se construye un árbol de relaciones adyacentes (Li *et al.*, 2018). Los picos de densidad (centros urbanos) se toman como ramas del árbol, que están conectadas dependiendo de los diferentes niveles de contorno de la superficie. Este proceso entrega un número  $N$  de ramas, donde  $N=1$  es una ciudad monocéntrica. Cada rama tiene tres indicadores: altura (corresponde a la estimación de la densidad en kernel de ese

territorios  
49-Especial

punto), área (representa la superficie total de la ciudad que pertenece a dicha rama) y volumen (se obtiene multiplicando el área y la altura de cada rama). Si definimos  $Br_i$  como el número de ramas de la ciudad  $i$  y  $v_k$  como el volumen de cada rama en orden decreciente ( $v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_{Br_i}$ ), el índice de policentrismo  $\phi_i$  se define como:

$$\phi_i = \frac{1}{v_1} \sum_{k=1}^{Br_i} kv_k \quad \text{Ecuación 5.}$$

El índice  $k$  dentro de la ecuación 5 incrementa el valor de  $\phi_i$  con el número de ramas, y la división por  $v_1$  se hace para obtener un índice comparable entre ciudades. Una ciudad con un índice de policentrismo de 1 es una ciudad monocéntrica, donde hay claramente un sitio con la mayor densidad de edificios dentro de su área urbana. Si la ciudad tiene dos

centros de igual tamaño, el índice toma un valor de 3. Si la ciudad tiene tres centros iguales distanciados entre sí, el índice toma un valor de 6. El índice de policentrismo crece exponencialmente con el número de centros, puesto que se asigna un valor mayor al hecho de tener más centros distintos y separados (figura 7).

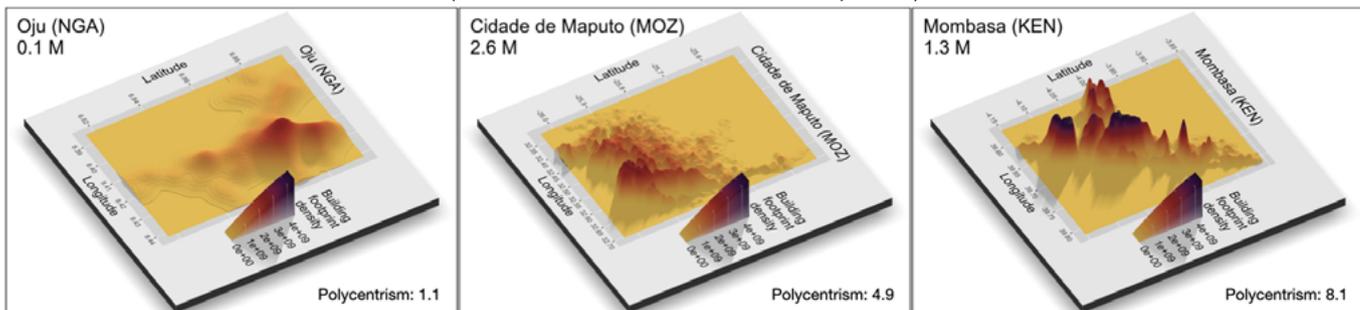
#### *Total footprint centre 1 km*

La huella de edificios a 1 km del centro mide el tamaño total del área edificada (la huella de los edificios), en un área circular con radio de 1 km alrededor del centro de mayor densidad de edificios identificado en cada ciudad.

#### *Centre density*

La medida de *densidad en el centro* corresponde al máximo valor de densidad identificado en cada ciudad, calculado

Figura 7. Ejemplos de diferentes medidas de policentrismo en vista 3D de la densidad de huella de edificios en la ciudad en un kernel de aproximadamente 250 m (modificada de Prieto-Curiel *et al.*, 2023)



*Nota.* Oju es un ejemplo claro de ciudad monocéntrica, mientras que Maputo y Mombasa muestran diferentes grados de policentrismo. Cada ciudad está a una escala espacial diferente.

con la estimación de densidad en kernel de la intensidad del número de edificios y su área construida por unidad de área.

### *Is pyramid*

La variable *es pirámide* mide la relación del área promedio de los edificios en 500 m alrededor del punto de mayor densidad de la ciudad, con respecto al área promedio de los edificios en toda el área urbana. Valores menores que 1 indican que la densidad en el área de 500 m alrededor del centro (punto de mayor densidad de edificios) de la ciudad, es menor que el valor promedio de la densidad de edificios de toda la ciudad. Valores mayores a 1 indican que la ciudad tiene mayor densidad de edificios en el centro que en el resto de la ciudad.

### **Análisis econométrico**

Luego de la integración de las diferentes fuentes de información y variables para las ciudades africanas, se obtuvo un conjunto de datos con 5.530 observaciones. Para explorar las relaciones entre forma urbana, espacios verdes y contaminación, se usaron modelos econométricos de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios (Ecuación 6). En la construcción de estos modelos se controló la multicolinealidad entre las variables independientes con las técnicas del número de multicolinealidad y el factor de incremento de varianza.

$$Y = c + \beta X + \epsilon \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde  $Y$  es la variable dependiente,  $c$  es una constante o intercepto,  $X$  es el vector de variables independientes,  $\beta$  es el vector de coeficientes asociado a las variables independientes, y  $\epsilon$  es el error o residual del modelo.

### **Resultados**

La tabla 1 muestra los resultados del modelo econométrico de la cantidad de espacio verde urbano como función de variables de forma urbana, población y controles geográficos. La cantidad de espacio verde urbano presenta una relación estadísticamente significativa con las variables de forma urbana, luego de controlar el tamaño de la población de la ciudad y la geografía física. Con respecto a los controles geográficos, los coeficientes muestran una relación inversa con la altitud promedio de la ciudad (a mayor altura, menos verde). También una relación positiva con la diferencia de alturas en la ciudad, que indica que ciudades en terrenos rugosos (con valles y colinas) tienden a conservar más espacios verdes dentro del tejido urbano por limitaciones para la construcción en pendiente. La relación con temperatura y precipitación es como se esperaba: a mayor temperatura máxima promedio, menos verde; y a mayor precipitación anual (lluvias), más verde. La variable de distancia a la costa

presenta una relación inversa con la cantidad de espacios verdes urbanos, la cual indica que las ciudades del interior tienen en general mayor cantidad de espacios verdes que las ciudades costeras. Por último, hay una relación inversa con la población que indica que a medida que las ciudades crecen en población, la cantidad de espacios verdes urbanos disminuye.

Las relaciones de la presencia de espacios verdes con las variables de forma urbana muestran que ciudades más elongadas y con mayor dispersión (más distancia entre edificios), tienden a mayor cantidad de espacio verde dentro del tejido urbano. Por otro lado, ciudades con mayor grado de policentrismo y mayor densidad —tanto de edificios por nodo como la densidad en su centro— también tienden a tener menor cantidad de espacios verdes. La relación con la variable *Is pyramid* es positiva, e indica que aquellas ciudades que tienen un centro más denso que el resto de la ciudad, suelen conservar más cantidad de espacios verdes urbanos. La figura 8 muestra los efectos para las variables dependientes del modelo, cuando el resto de predictores se fija constante con su valor promedio.

La tabla 2 muestra los resultados del modelo econométrico de contaminación del aire ( $PM_{2.5}$  en 2019) como función de las métricas de forma urbana, la cantidad de espacios verdes urbanos, el tamaño de

la población de la ciudad y los controles geográficos. La concentración promedio anual de  $PM_{2.5}$  en el aire, también tiene relación estadísticamente significativa con la forma urbana, incluyendo la presencia de espacios verdes urbanos (*UGS fraction*). El modelo muestra la relación esperada de la contaminación del aire con material particulado y los controles geográficos: una relación inversa con la elevación, que indica que a mayor altitud, menor contaminación; una relación inversa con la pendiente promedio del terreno de la ciudad; una relación directa con la temperatura máxima anual e inversa con la precipitación anual, que indica que tanto las zonas más calientes, como las más áridas (con menos precipitación), presentan mayor contaminación por material particulado. Así mismo existe una relación directa entre la concentración de  $PM_{2.5}$  y la distancia a la costa, que es la relación esperada, ya que la contaminación por material particulado está asociada a fuentes en tierra firme. De igual manera, el modelo muestra una relación positiva entre la contaminación y el tamaño de la población: las ciudades más grandes tienden a ser más contaminadas. Con respecto a la región geográfica, se encontró relación significativa negativa con la pertenencia a la región este y una relación positiva con la pertenencia a la región oeste.

**Tabla 1. Modelo econométrico de la cantidad de espacio verde urbano como función de variables de forma urbana y controles geográficos**

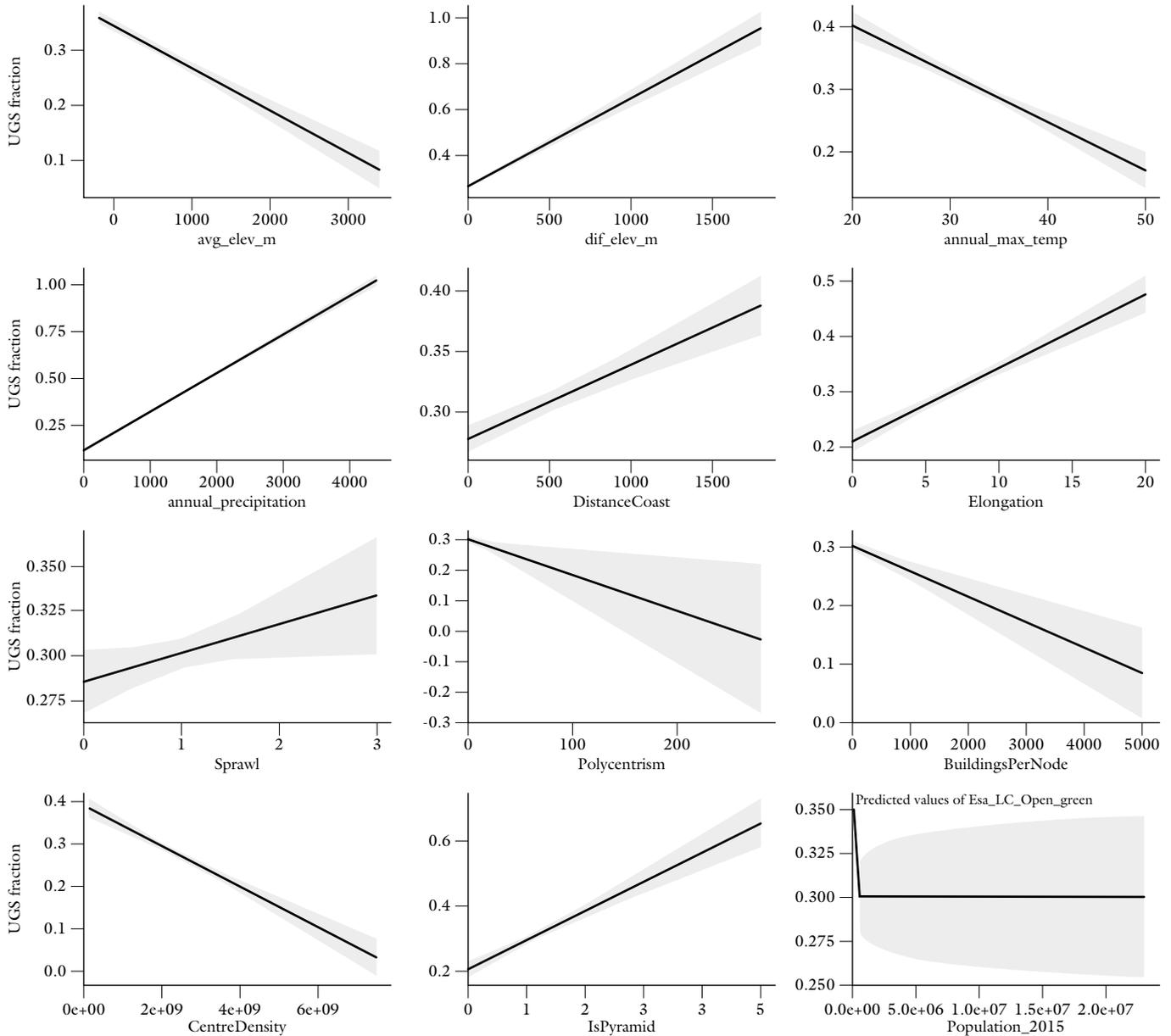
	Dependent variable UGS fraction
Controls	
Average elevation	-0,0001*** (0,00001)
Difference in elevation	0,0004*** (0,00002)
Annual maximum temperature	-0,008*** (0,001)
Annual precipitation	0,0002*** (0,00000)
Distance to coast	0,0001*** (0,00001)
Log(Population 2015)	-0,00001 (0,004)
Urban form variables	
Elongation	0,013*** (0,001)
Sprawl	0,016** (0,008)
Polycentrism	-0,001*** (0,0005)
Buildings per node	-0,00004*** (0,00001)
Centre density	-0,000*** (0,000)
Is pyramid	0,089*** (0,010)
Constant	0,258*** (0,044)
R <sup>2</sup>	0,546
Adjusted R <sup>2</sup>	0,545
Residual std, error	0,165 (df = 5.517)
F Statistic	552.626*** (df = 12; 5.517)

Nota. N = 5.530. Errores estándar mostrados entre paréntesis. Significancia estadística: \* p < 0,1; \*\* p < 0,05; \*\*\* p < 0,01.

Los resultados muestran que existe relación estadísticamente significativa con la presencia de espacios verdes, la dispersión de la mancha urbana (*sprawl*), y las medidas de densidad de edificios por nodo de la malla vial, el tamaño de la huella de los edificios en 1 km desde el centro de mayor densidad de la ciudad, la conectividad de las calles de la malla vial, la densidad de intersecciones viales y la configuración de la densidad de edificios (*Is pyramid*). En este modelo, las medidas de elongación y el grado de policentrismo no muestran relación estadísticamente significativa con la contaminación del aire.

La relación entre contaminación y presencia de espacios verdes es inversa: mayor cantidad de espacios verdes se asocia con menores niveles promedio de PM<sub>2,5</sub>. La relación con la dispersión de la ciudad es negativa: las ciudades con mayor dispersión tienden a registrar cantidades más altas de espacios verdes en su entramado urbano, como se verificó en el modelo anterior. Las medidas de densidad de número de edificios por nodo, la huella de los edificios en el centro y el grado de conectividad promedio, muestran una relación negativa con la contaminación que indican que densidades altas, mayor conectividad y un centro más edificado y más denso que el resto de la ciudad (*Is pyramid*), se relacionan con niveles más bajos de contaminación a lo largo de la ciudad. Por otro lado, la relación con la densidad de intersecciones viales tiene una relación positiva con la contaminación,

Figura 8. Gráficos de efectos del modelo de presencia de espacios verdes y métricas de forma urbana



Nota. Efectos para cada variable independiente cuando el resto de variables independientes se fijan en el valor promedio.

que puede explicarse por el hecho de que un número más alto de intersecciones implica mayor consumo de combustible, porque los vehículos deben detenerse y volver a iniciar la marcha desde cero. La figura 9 muestra los efectos de las variables independientes sobre la contaminación del aire.

**Tabla 2. Modelo econométrico de contaminación del aire como función de la cantidad de espacio verde urbano y la forma urbana**

	Dependent variable PM <sub>2.5</sub> (2019)
Controls	
Average elevation	-0,001 (0,0005)
Average slope	-0,556*** (0,106)
Annual maximum temperature	0,523*** (0,070)
Annual precipitation	-0,004*** (0,0005)
Distance to coast	0,020*** (0,001)
Log(Population 2015)	3,669*** (0,284)
Region North	-0,179 (0,930)
Region West	14,098*** (0,765)
Region East	-4,746*** (0,746)
Region South	-0,681 (0,927)
Urban form variables	
UGS fraction	-14,677*** (0,973)
Elongation	0,094 (0,094)
Sprawl	-1,319** (0,560)
Polycentrism	0,015 (0,030)

	Dependent variable PM <sub>2.5</sub> (2019)
Buildings per node	-0,002*** (0,001)
Total footprint centre 1 km	-0,00002*** (0,00000)
Average node degree	-4,559*** (0,325)
Intersection density	0,035*** (0,003)
Is pyramid	-2,444*** (0,686)
Constant	8,566*** (3,898)
R <sup>2</sup>	0,526
Adjusted R <sup>2</sup>	0,524
Residual std. error	11,253 (df = 5.510)
F Statistic	552,626*** (df = 19; 5.510)

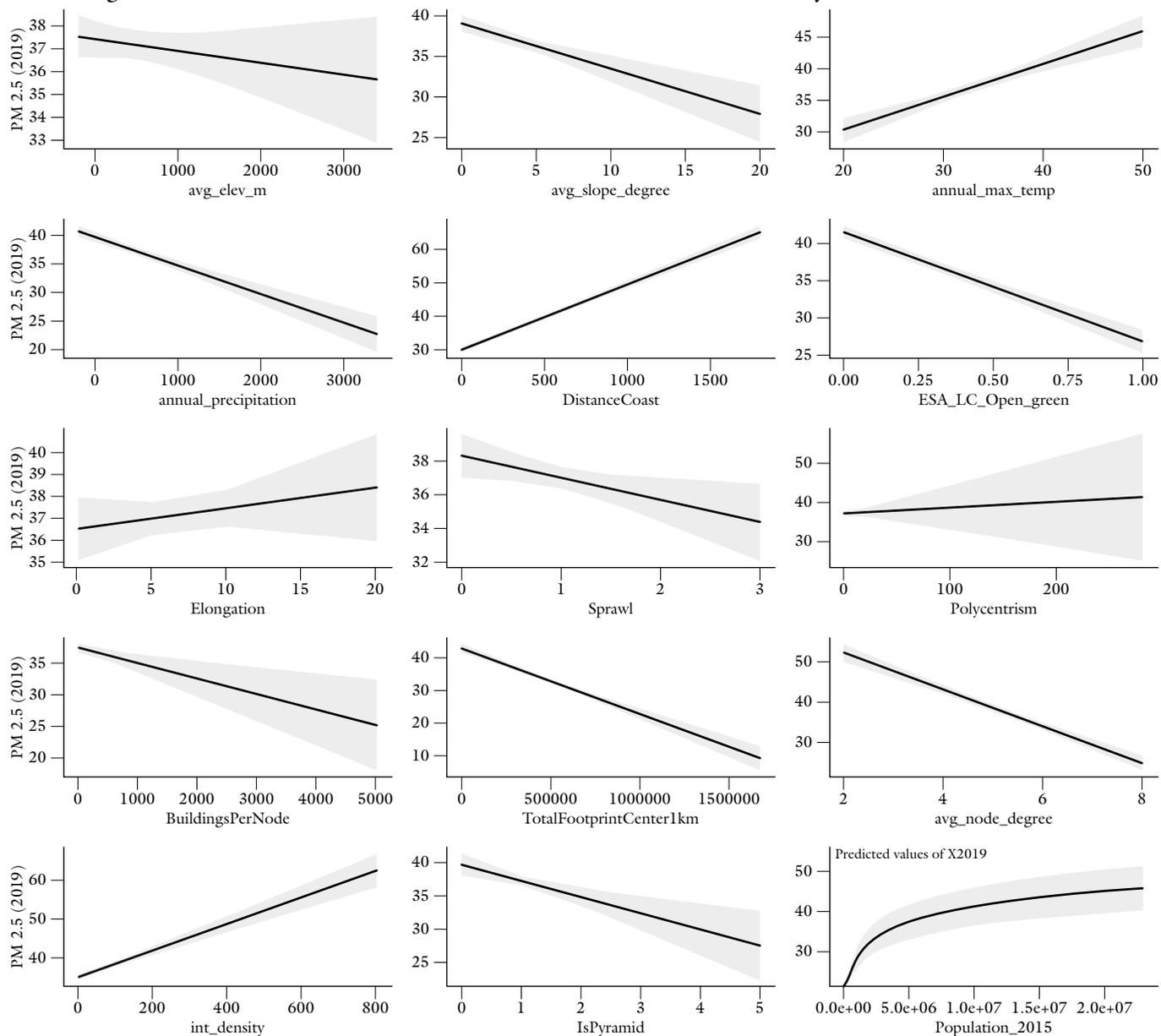
*Nota.* N = 5.530. Errores estándar mostrados entre paréntesis. Significancia estadística: \* p < 0,1; \*\* p < 0,05; \*\*\* p < 0,01.

## Discusión

En África, la urbanización suele estar descontrolada y descoordinada, lo cual contribuye a una variedad de formas urbanas en las ciudades africanas (OCDE/swAC, 2020). La evidencia muestra que el crecimiento urbano a través de estrategias de reurbanización y relleno, que conducen a una mayor compacidad, provoca una disminución de los espacios verdes en detrimento de la resiliencia y el bienestar de los habitantes de la ciudad (Gavriliadis *et al.*, 2019; Giezen *et al.*, 2018; Jim & Chan, 2016). Este análisis coincide en que una mayor compacidad conduce a

territorios  
49-Especial

Figura 9. Gráficos de efectos de las relaciones entre contaminación del aire y métricas de forma urbana



Nota. Efectos para cada variable independiente cuando el resto de variables independientes se fijan en el valor promedio.

menos espacios verdes en las aglomeraciones urbanas, como se observa en otras regiones del planeta. Esto es válido para las dos medidas de compacidad: expansión (*sprawl*) y elongación. La disminución de las distancias entre los edificios, una señal de un crecimiento por relleno (*infill*), ejerce presión sobre los espacios verdes dentro de los límites de las ciudades africanas. En la figura 9 se muestra que una forma más circular y una urbana muy compacta (valores bajos de *elongation* y *sprawl*), se asocian con menor presencia de espacios verdes. De la misma forma, el modelo enseña que más gente viviendo en una ciudad conduce a menos presencia de espacios verdes. Esta tendencia a la desaparición de espacios verdes en las ciudades va en detrimento del bienestar de los residentes. Si esta tendencia continúa, el efecto isla de calor urbano podría ser frecuente, cada vez más intenso y empeoraría las olas de calor. La Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo Espacial de Nigeria señaló que la posible pérdida de espacios verdes es perjudicial para la salud pública, ya que la temperatura de la superficie terrestre en los 300 m que rodean los parques públicos de Abuja es casi 2-3 °C más fría (Chibuike *et al.*, 2018), lo cual ayuda a los residentes cercanos a hacer frente a las olas de calor. Sin embargo, no se trata solo de las olas de calor, sino de que podrían aumentar las inundaciones repentinas. En Kumasi (Ghana), la desaparición de los espacios verdes entre el 2004 y 2017 provocó

aumentos drásticos en el número de personas que sufrieron inundaciones (100 veces más), porque los ríos se desbordan habitualmente en el pico de la temporada de lluvias inundando los asentamientos cercanos. El reemplazo de espacios verdes por concreto, pavimento y otras superficies impermeables fue una de las causas de mayor incidencia de inundaciones (Abass *et al.*, 2020). Los formuladores de políticas pueden encontrar formas de conservar los espacios verdes al crecer verticalmente. Las ciudades pueden crecer (es decir, sumar más personas) de tres maneras: (1) agregando más extensión al crecer hacia afuera (crecimiento horizontal), (2) hacia adentro (relleno o redesarrollo), o (3) hacia arriba (construir edificios más altos, es decir, crecimiento vertical) (Lall *et al.*, 2021). El análisis muestra que las ciudades que crecen verticalmente y que tienen mayor densidad construida en el centro, denominadas “pirámides” (Lall *et al.*, 2021), tienen una disponibilidad de espacio verde mayor que las ciudades que se extienden horizontalmente, donde predominan los edificios bajos (1 o 2 plantas).

Una consecuencia de mayor urbanización es el aumento de la contaminación del aire exterior, que es una gran amenaza para la salud, el capital humano y el desarrollo económico (Fisher *et al.*, 2021). La contaminación del aire exterior contribuye a las muertes prematuras, incluidas la neumonía, las enfermedades cardíacas, los accidentes cerebrovasculares, la diabetes,

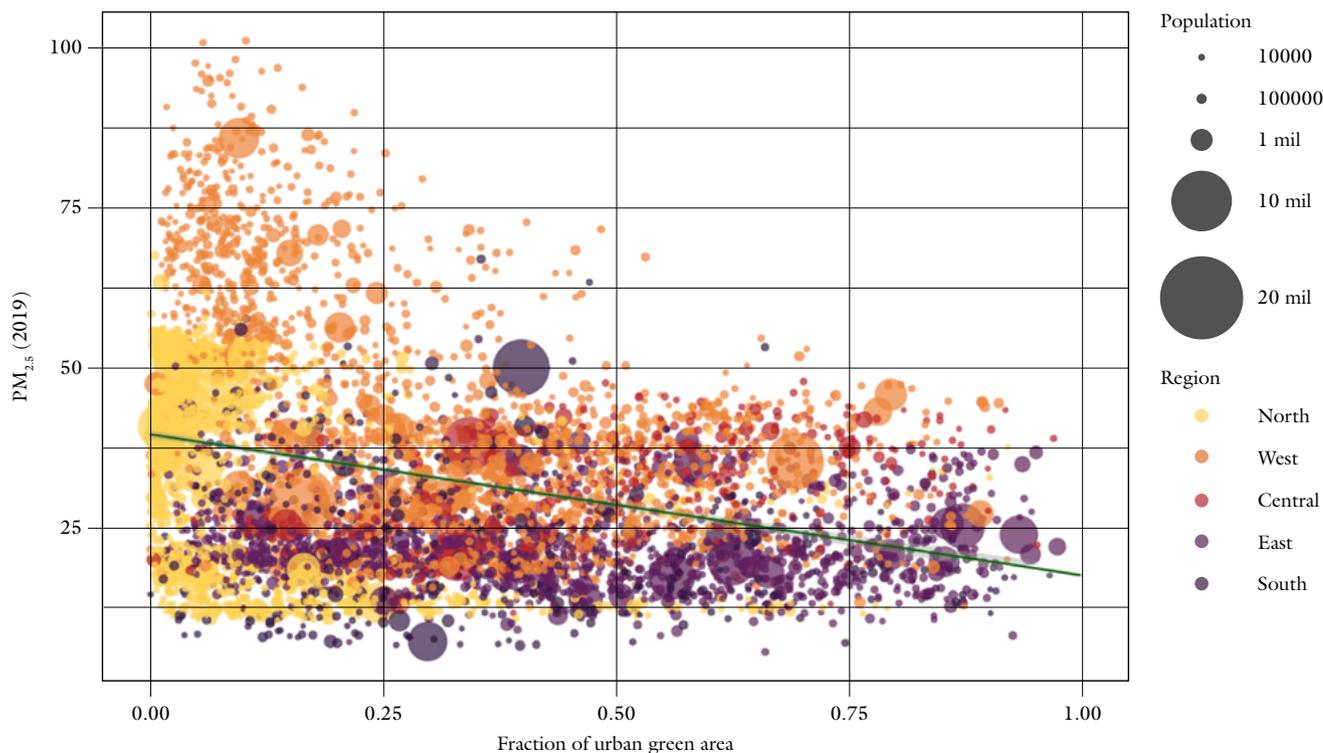
las enfermedades pulmonares crónicas y el cáncer de pulmón. La contaminación del aire exterior no es solo un problema de salud sino también compete lo económico. La producción económica perdida por enfermedades relacionadas con la contaminación del aire fue de 3.000 millones (en US dólares de 2019) en Etiopía (1,16 % del PIB), 1.600 millones (0,95 % del PIB) en Ghana y 349 millones (1,19 % del PIB) en Ruanda (Fisher *et al.*, 2021). Controlar la contaminación del aire exterior es

un tema crucial para las próximas décadas. Los modelos muestran que una mayor disponibilidad de espacios verdes está asociada con una menor contaminación del aire en las ciudades estudiadas, luego de tomar en cuenta la geografía física y la forma urbana. Por lo tanto, los espacios verdes urbanos podrían usarse como una herramienta, entre muchas, para limitar la contaminación del aire exterior.

La figura 10 muestra la fracción de área verde en cada ciudad africana, en

**Figura 10. Contaminación del aire y presencia de espacios verdes en las ciudades de África**

Green space and air pollution



comparación con el nivel de contaminación del aire. Las ciudades donde los espacios verdes están asociados con una contaminación del aire significativamente menor, tienden a tener un paquete de políticas más integral para abordar la contaminación del aire, por ejemplo, reducciones en la importación de automóviles usados. África importa el 40% de vehículos usados del mundo. Estos vehículos a menudo tienen altas emisiones y malas condiciones, en general relacionadas con su edad y grado de desgaste. Varios países de las regiones del norte, sur y oeste de África han prohibido por completo la importación de automóviles usados o tienen límites de edad para los automóviles usados que se pueden importar. La efectividad de los espacios verdes para disminuir la contaminación del aire podría depender del paquete de políticas más amplio que se implemente.

## Conclusiones

En esta investigación se muestra cómo usar datos abiertos para un análisis de escala continental de la forma urbana, la contaminación y la presencia de espacios verdes urbanos en las ciudades de África. Toda la información usada en este análisis es abierta, lo que hace que este se pueda replicar en otras regiones del planeta. Las limitaciones asociadas al uso de estos datos estarían más en el campo de las habilidades y competencias necesarias para manipular, integrar y analizar este tipo

de datos geográficos, que con la falta de información.

Preservar y aumentar los espacios verdes urbanos es un desafío considerable a la luz de otros asuntos más visibles como la pobreza, el transporte y la vivienda informal. Sin embargo, mejorar y aumentar el espacio verde urbano es, al mismo tiempo, una gran oportunidad. Los espacios verdes pueden reducir significativamente la contaminación del aire, especialmente cuando se integran en un paquete de políticas más amplio, como las prohibiciones de importación de ciertos vehículos altamente contaminantes. Las lecciones de impulsar los espacios verdes en otras regiones han mostrado que apuntar a las áreas más concurridas de las ciudades para la restauración de espacios verdes podría tener el impacto más significativo. Sin embargo, para aprovechar todos los beneficios de los espacios verdes, es vital garantizar que los espacios verdes urbanos no solo estén presentes, sino que a su vez, existan parches de diferentes tamaños bien distribuidos por toda la ciudad.

## Referencias

Abass, K., Buor, D., Afriyie, K., Dumedah, G., Segbefi, A. Y., Guodaar, L., Garsonu, E. K., Adu-Gyamfi, S., Forkuor, D., Ofosu, A., Abbas. M., & Gyasi, R. M. (2020). Urban sprawl and green space depletion: Implications for flood incidence in Kumasi, Ghana. *International Journal of*

*Disaster Risk Reduction*, 51, Article 101915. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101915>

Angel, S., Arango Franco, S., Liu, Y., & Blei, A. M. (2018). The shape compactness of urban footprints. *Progress in Planning*, 139, Article 100429. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2018.12.001>

Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>

Chibuike, E., Ibukun, A. O., Abbas, A., & Kunda, J. J. (2018). Assessment of green parks cooling effect on Abuja urban microclimate using geospatial techniques. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 11-21. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2018.04.006>

Fisher, S., Bellinger, D. C., Cropper, M. L., Kumar, P., Binagwaho, A., Koudoukpo, J. B., Park, Y., Taghian, G., & Landrigan, P. J. (2021). Air pollution and development in Africa: Impacts on health, the economy, and human capital. *The Lancet Planetary Health*, 5(10), e681-e688. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00201-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00201-1)

Gavrilidis, A. A., Niță, M. R., Onose, D. A., Badiu, D. L., & Năstase, I. I. (2019). Methodological framework for urban

sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure. *Ecological Indicators*, 96(2), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.054>

Giezen, M., Balikci, S., & Arundel, R. (2018). Using remote sensing to analyse net land-use change from conflicting sustainability policies: The case of Amsterdam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 381. <https://doi.org/10.3390/ijgi7090381>

Hong, A., Martínez, L., Patino, J. E., Duque, J. C., & Rahimi, K. (2021). Neighbourhood green space and health disparities in the global South: Evidence from Cali, Colombia. *Health & Place*, 72, Article 102690. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102690>

Jim, C. Y., & Chan, M. W. (2016). Urban greenspace delivery in Hong Kong: Spatial-institutional limitations and solutions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 65-85. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2016.03.015>

Jimenez, M., Elliot, E. G., DeVille, N. V., Laden, F., Hart, J. E., Weuve, J., Grodstein, F., & James, P. (2022). Residential green space and cognitive function in a large cohort of middle-aged women. *JAMA Network Open*, 5(4), e229306-e229306. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.9306>

- Lall, S., Lebrand, M., Park, H., Sturn, D., & Venables, A. (2021), *Pancakes to Pyramids: City form to promote sustainable growth*. World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/554671622446381555/pdf/City-Form-to-Promote-Sustainable-Growth.pdf>
- Li, C., Guo, P., Wu, P., & Liu, X. (2018). Extraction of terrain feature lines from elevation contours using a directed adjacent relation tree. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), 163. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050163>
- Masson-Delmotte, V. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. <https://doi.org/ipcc-2018-1.5-5062019>
- Mensah, C. (2014). Destruction of urban green spaces: A problem beyond urbanization in Kumasi city (Ghana). *American Journal of Environmental Protection*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.11>
- NASA JPL. (2020). *NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001*. [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. [https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM\\_HGT.001](https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001)
- Organization for Economic Co-operation and Development/Sahel and West Africa Club Secretariat [OECD/SWAC]. (2020). *Africa's Urbanisation Dynamics 2020: Africapolis, Mapping a New Urban Geography*. West African Studies, OECD Publishing. [https://read.oecd-ilibrary.org/development/africa-s-urbanisation-dynamics-2020\\_b6b-ccb81-en#page4](https://read.oecd-ilibrary.org/development/africa-s-urbanisation-dynamics-2020_b6b-ccb81-en#page4)
- OECD. (2021). *Scaling up nature-based solutions to tackle water-related climate risks: Insights from Mexico and the United Kingdom*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/736638c8-en>
- Osima, S., Indasi, V. S., Zaroug, M., Endris, H. S., Gudoshava, M., Misiani, H. O., Nimusiima, A., Anyah, R. O., Otieno, G., Ogwang, B. A., Jain, S., Knodowe, A. L., Mwangi, E., Lennard, C., Nikulin, G., & Dosio, A. (2018). Projected climate over the greater horn of Africa under 1.5 °C and 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 13(6), Article 065004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AABA1B>
- Page, J., Gutman, J., Madden, P., & Gandhi, D. (2020). Urban economic growth in Africa: A framework for analyzing constraints to agglomeration. *Working Paper*, 24. Brookings Institute. [https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/09/20.09.28\\_urban\\_](https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/09/20.09.28_urban_)

territorios  
49-Especial

economic\_growth\_in\_africa\_FINAL.pdf (accessed on 28 April 2022).

- Patino, J. E., Hong, A., Duque, J. C., Rahimi, K., Zapata, S., & Lopera, V. M. (2021). Built environment and mortality risk from cardiovascular disease and diabetes in Medellín, Colombia: An ecological study. *Landscape and Urban Planning*, 213, 104-126. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104126>.
- Prieto-Curiel, R., Patino, J. E., & Anderson, B. (2023). Scaling of the morphology of African cities. *PNAS*, 120(9), e2214254120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2214254120>
- Rigolon, A., Browning, M. H., Lee, K., & Shin, S. (2018). Access to urban green space in cities of the Global South: A systematic literature review. *Urban Science*, 2(3), 67. <https://doi.org/10.3390/urbansci2030067>
- Rohat, G., Flacke, J., Dosio, A., Dao, H., & Van Maarseveen, M. (2019). Projections of Human Exposure to Dangerous Heat in African Cities Under Multiple Socioeconomic and Climate Scenarios. *Earth's Future*, 7(5), 528-546. <https://doi.org/10.1029/2018EF001020>.
- Sirko, W., Kashubin, S., Ritter, M., Annkah, A., Bouchareb, Y. S. E., Dauphin, Y., Keysers, D., Neumann, M., Cisse, M., & Quinn, J. A. (2021). Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. *arXiv preprint arXiv:2107.12283*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.12283>
- Van Donkelaar, A., Hammer, M., Bindle, L., Brauer, M., Brook, J., Garay, M., Hsu, N., Kalashnikova, O., Kahn, R., Lee, C., Levy, R., Lyapustin, A., Sayer, A., & Martin, R. (2021). Monthly global estimates of fine particulate matter and their uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 55(22), 15287-15300. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05309>
- Wood, L., Hooper, P., Foster, S., & Bull, F. (2017). Public green spaces and positive mental health – investigating the relationship between access, quantity and types of parks and mental wellbeing. *Health & Place*, 48, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2017.09.002>
- WorldClim. (2020). *Historical Climate Data*. WorldClim. <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, L., Tsendbazar, N., Ramoino, F., & Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5571936>