



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DE LA SUSTENTABILIDAD PARA 100 DE
LOS CENTROS URBANOS MÁS GRANDES DEL
MUNDO ASÍ COMO SUS FUTUROS NIVELES DE
EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A :

NAYELI LIPRANDI CORTES

TUTOR

FRANCISCO ESTRADA PORRÚA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

«Lo que quiero conseguir del curso de la universidad es algún conocimiento sobre la mejor manera de vivir la vida y sacarle el máximo y mejor provecho. Quiero aprender para entender y para ayudar a otra gente y a mí misma.»

Lucy Maud Montgomery

«Women, they have minds, and they have souls, as well as just hearts. And they've got ambition, and they've got talent, as well as just beauty. I'm so sick of people saying that love is all a woman is fit for.»

Louisa May Alcott

Dedicatoria

A mis padres, Marisela y Alejandro, y a mi hermano Rodrigo. Sin el apoyo y el amor que me han dado durante toda mi vida yo no estaría aquí, cumpliendo un sueño más. Gracias por todas sus palabras de aliento y todo el esfuerzo que han hecho para que haga todo lo que amo. Mis logros son suyos.

A Leticia, David, Diego y Angela, por siempre apoyarme en mis proyectos, ayudarme cuando los necesito y quererme mucho toda mi vida. No podría pedir a una mejor familia que ustedes.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor, Francisco Estrada Porrúa, por permitirme trabajar con usted para desarrollar un trabajo tan interesante y sobre temas que me apasionan muchísimo. Admiro mucho a lo que se dedica y es una fuente de inspiración para mí.

También quiero agradecer al doctor Marcelo del Castillo Mussot, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo en el área de la econofísica y por darme la oportunidad de publicar mis primeros artículos científicos.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haber sido mi segunda casa desde el bachillerato y por haberme brindado enormes oportunidades académicas y personales.

Agradezco a la Facultad de Ciencias por formarme como científica y darme una de las mejores etapas de mi vida.

A todos profesores que tuve a lo largo de mi carrera. Ustedes me inspiraron a ser una mujer de ciencia. Entre ellos, quiero agradecer especialmente a la doctora Mónica Borunda Pacheco por hacerme partícipe de sus proyectos.

También agradezco al Taller de Ciencia para Jóvenes del Centro de Geociencias de la UNAM, proyecto PAPIME-PE100915: *Simiente de investigadores* de la DGAPA, por brindarme la oportunidad de acercarme por primera vez a la ciencia.

A Sebastian, gracias por apoyarme en todo lo que hago y todo lo que quiero hacer, y gracias por acompañarme durante esta etapa de mi vida.

A Miriam y a Beni, por ser mis compañeros y grandes amigos durante toda la carrera. Les agradezco mucho su apoyo y su amistad en estos años.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han estado presentes a lo largo de mi vida y que me han brindado su amistad y su apoyo.

Índice general

1	Resumen	1
2	La situación actual	3
2.1	Cambio climático	3
2.2	Centros urbanos	8
2.3	Sustentabilidad	10
2.4	Centros urbanos sustentables	14
3	Objetivos	16
4	Datos y metodología	17
4.1	Sobre la base de datos UCDB	17
4.1.1	Definición de centro urbano	18
4.1.2	Indicadores	19
4.2	Análisis Estadístico Multivariado	29
4.2.1	Análisis por componentes principales	29
4.2.2	Algoritmos de agrupamiento	32
4.3	Análisis de los centros urbanos	34
5	Resultados y discusión	38
5.1	Análisis por componentes principales	38
5.1.1	Comparación entre componentes	45
5.2	Agrupamiento de los centros urbanos	52
5.3	Evaluación de la sustentabilidad	58
5.4	Cambio climático	61
6	Conclusiones	72
	Apéndice A Lista de los 100 centros urbanos	74
	Apéndice B Acuerdos y tratados internacionales	79
	Apéndice C Análisis estadístico e índice compuesto	81
	Apéndice D Glosario de abreviaturas	85
	Bibliografía	86

1 Resumen

En el presente trabajo se realizó una evaluación de la sustentabilidad para 100 de los centros urbanos¹ más grandes del mundo, tomando como referencia la cantidad de población residiendo en cada centro. Se utilizó la base de datos *Urban Center Database* de la Comisión Europea, la cual incluye indicadores en las dimensiones geográfica, socio-económica, ambiental, de exposición a riesgos y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de 10,000 centros urbanos.

Se tomó el concepto de la sustentabilidad ya que es el que mejor se acopla al propósito de esta tesis. Además, dada su relevancia y popularidad en la política pública, en las organizaciones globales, regionales y en los acuerdos internacionales, es uno de los conceptos más estudiados y que cuenta con métricas claras, objetivas y universales en muchas de sus dimensiones. Por estas razones se considera más factible e informativo realizar un estudio cuantitativo de ella.

Se seleccionaron 32 indicadores de la base de datos original y se les aplicó un análisis por componentes principales para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos sin perder mucha información. Se encontraron 9 componentes principales (CP) a las que se les aplicó una rotación varimax normalizada para una mejor interpretación. Estas componentes se resumen en la siguiente tabla.

CP	Descripción
1	Grado de urbanización
2	Emisiones de CO ₂ y PM _{2.5} , y exposición a inundaciones
3	Presencia de espacios verdes
4	Nivel de desarrollo socio-económico
5	Exposición a marejadas ciclónicas
6	Exposición a sismos
7	Acceso a servicios
8	Exposición a olas de calor
9	Expansión de la mancha urbana

¹Un centro urbano es una agrupación con una densidad de al menos 1500 habitantes por km², o al menos un 50% de superficie construida y una población mínima de 50,000 personas [1].

Las nuevas componentes representan el 82.3 % de la varianza del conjunto de datos original y recopilan y resumen las características principales de cada centro urbano. A partir de ellas, se realizó un agrupamiento jerárquico aglomerativo de las 100 ciudades usando el método de Ward. El agrupamiento demostró una estrecha relación con la ubicación geográfica de las ciudades.

Usando las componentes 1-5 y 7-9 se creó un índice de sustentabilidad para los centros urbanos dependiendo si los valores obtenidos en cada componente contribuían a su sustentabilidad. Se encontró que las regiones del sur de Asia son las que tienen los puntajes más bajos, mientras que las regiones de Europa, América y partes de África obtuvieron puntajes medios y altos en el índice.

Posteriormente, utilizando las proyecciones obtenidas de los modelos climáticos incluidos en el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC, se realizó un agrupamiento del índice de sustentabilidad con el aumento de la temperatura y los cambios en la precipitación para finales de siglo de acuerdo con los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Además, se creó un índice compuesto utilizando distancias euclidianas estandarizadas para obtener una medida del cambio conjunto de la temperatura y la precipitación en cada centro urbano.

En el caso del escenario RCP2.6 se encontró que los mayores cambios en la temperatura y precipitación tienden a coincidir con puntajes bajos del índice de sustentabilidad. Además, los cambios más pequeños de las variables climáticas tienden a ocurrir en ciudades con los puntajes medios y altos del índice. Esto significa que muchas ciudades que ya presentan un desarrollo poco sustentable serán las que enfrentarán mayores riesgos debido al cambio climático. Los centros urbanos ubicados en el sur de Asia son los que tendrían una mayor exposición a este fenómeno.

En el escenario RCP8.5, las proyecciones indican cambios mucho más pronunciados en la precipitación y la temperatura. Por lo que existen centros urbanos que a pesar de tener altos valores en el índice de sustentabilidad, tendrán una mayor exposición al cambio climático. En particular, las regiones de Europa y el sur de Asia son las que presentarían los mayores cambios en temperatura y precipitación.

El presente trabajo sirve para dar un análisis cuantitativo y objetivo de la sustentabilidad de los centros urbanos más grandes del mundo, así como de su futura exposición al cambio climático. Sin embargo, es necesario expandir la base de datos con el fin de tomar más indicadores que engloben todas las dimensiones de la sustentabilidad, así como tomar en cuenta la interrelación de estas dimensiones. Además, se podrían implementar medidas y referencias a escala local y regional, adaptadas a los criterios que cada centro urbano considere que es lo más importante para su propia calidad de vida, tomando en cuenta a los grupos marginados y desde una perspectiva de género, de manera que se tenga un análisis más completo y apegado a la sustentabilidad.

2 La situación actual

2.1. Cambio climático

De acuerdo con el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (o IPCC por sus siglas en inglés), el cambio climático es inequívoco [2]. Más aún, la crisis climática ha exacerbado fenómenos como la degradación ambiental, el riesgo del colapso ecológico y el avance de la desigualdad y la pobreza. Estos fenómenos son manifestaciones del malestar de la sociedad y de la crisis del mundo globalizado, además de que son el resultado de procesos históricos de exclusión económica, política, social y cultural [3, 4].

Para comprender este fenómeno, es importante entender que el clima de la Tierra es un sistema impulsado por la energía incidente del Sol. Esta energía es el motor de procesos como la fotosíntesis, la evaporación y el derretimiento en el ciclo del agua, y calienta a la Tierra [5]. Cuando existe un balance entre la radiación proveniente del Sol que absorbe la Tierra (radiación de onda corta) y la energía que la Tierra emite al espacio en forma de radiación de onda larga, esto permite que la Tierra se encuentre en un equilibrio radiativo manteniendo una temperatura y un clima relativamente estables.

Este balance de energía se puede apreciar en la figura 2.1 donde podemos tomar la cantidad total de radiación que llega a la Tierra proveniente del Sol como 100 unidades (color azul). De estas, 30 unidades son reflejadas al espacio por las nubes y la superficie terrestre, 23 unidades son absorbidas por las atmósfera y las nubes, y 47 unidades son absorbidas por la superficie. Para mantener el balance de energía, la superficie de la Tierra debe emitir las 47 unidades absorbidas (color naranja) a través de los procesos de calor latente (agua en forma de vapor que asciende y se condensa), calor sensible (convección de las corrientes de aire) y de radiación infrarroja emitida desde la superficie. Gran parte de la energía emitida por la superficie de la Tierra es absorbida por las moléculas presentes en la atmósfera (color rojo) incluyendo a los gases de efecto invernadero GEI [6].

Cuando estos gases absorben la energía infrarroja, aumentan su temperatura y emiten una mayor cantidad de energía térmica en todas direcciones. Parte de la energía emitida llega a la superficie del planeta y es absorbida. Por tanto, la radiación que llega a la superficie de la Tierra es mayor que si sólo hubiera radiación solar incidente, haciendo que la Tierra aumente su temperatura. Este es el efecto invernadero natural y hace que la Tierra tenga una temperatura promedio de 15°C [5].

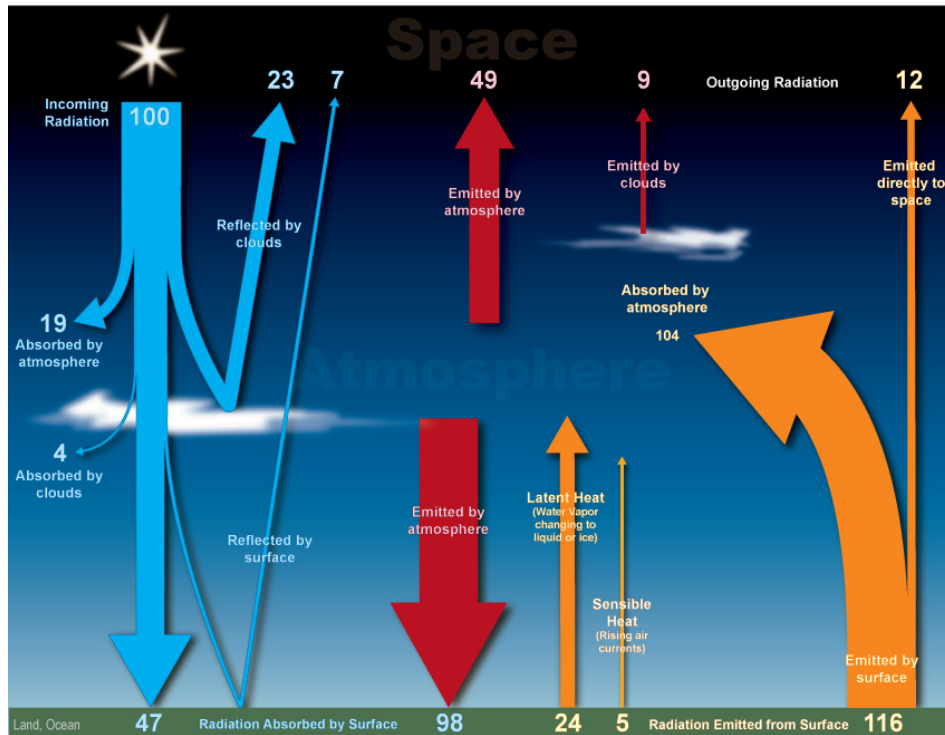


Figura 2.1: Balance de la energía terrestre (NOAA, 2019) [6].

Los GEI permitieron que se estableciera una temperatura óptima para el desarrollo de la vida en nuestro planeta; y a pesar de que el clima terrestre ha cambiado a lo largo de la historia, la mayoría de estos cambios se atribuyen a pequeñas variaciones en la órbita planetaria, lo que modifica la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra, modificando su temperatura [7].

A partir de la revolución industrial, las actividades antropogénicas (quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo, construcción) han llevado a un aumento paulatino en la emisión de estos gases, lo que ha llevado a un aumento en el forzamiento radiativo terrestre¹, y a un calentamiento global [5].

El principal gas responsable de este fenómeno es el dióxido de carbono CO_2 , generado en su mayor parte por la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), reacciones químicas (manufactura de cemento) y la deforestación. La enorme relevancia de este GEI recae en que es más abundante que otros gases y se mantiene en la atmósfera por mucho más tiempo. Debido a esto, el dióxido de carbono es responsable por dos terceras partes del desequilibrio de la energía en la Tierra [8]. En las últimas décadas ha habido un aumento sin precedentes en la concentración de CO_2 de la atmósfera terrestre (figura 2.2).

¹Es el cambio neto en el balance de energía de la Tierra (la diferencia entre la energía incidente proveniente del Sol menos la energía emitida por la Tierra al espacio). El forzamiento radiativo positivo indica que la Tierra recibe mayor radiación solar de la que emite al espacio, causando un calentamiento en el sistema.

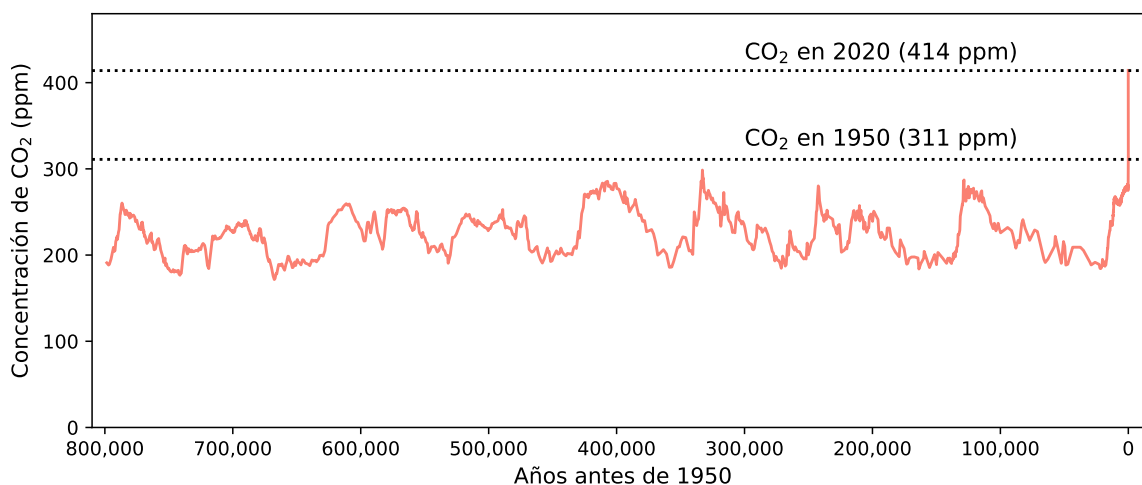


Figura 2.2: Concentración de CO_2 en los últimos 800,000 años. La gráfica fue basada en los datos de [9] vía el *Programa de Paleoclimatología de la NOAA NCEI*, [10] *NOAA Mauna Loa CO2 Record* y [11].

El segundo GEI más importante es el metano (CH_4). Este es generado principalmente en la producción y transporte de gas, petróleo y carbón, así como en el sector agrícola, ganadero y en el cambio de uso de suelo [2]. A pesar de que este gas permanece en la atmósfera tan solo por 12 años, su potencial de calentamiento global es 25 veces mayor que el del dióxido de carbono [12].

Entre otros GEI también se encuentran el óxido de nitrógeno (N_2O), generado en actividades agrícolas, actividades industriales y en la quema de combustibles fósiles; este gas tiene un potencial de calentamiento global 298 veces mayor que el CO_2 [13]. Y los gases fluorados (hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre, entre otros) generados principalmente en procesos industriales [2].

El aumento de la temperatura trae consigo alteraciones en los ciclos del carbono, del agua y del nitrógeno; y finalmente, alteraciones en la composición y la dinámica de todos los ecosistemas del mundo [2]. Entre las principales consecuencias climáticas se encuentran el calentamiento de los océanos y la atmósfera, la reducción de los casquetes polares, el retroceso de los glaciares, la acidificación de los océanos, el aumento del nivel del mar, y una mayor frecuencia en eventos extremos: olas de calor más intensas y prolongadas, precipitaciones, inundaciones, marejadas ciclónicas, incendios forestales, sequías, entre otros [7].

Para tener una visión de las futuras consecuencias del cambio climático se utilizan cuatro escenarios llamados *Trayectorias de Concentración Representativas* (RCP por sus siglas en inglés) las cuales modelan el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero, su concentración en la atmósfera, la contaminación del aire y el uso de la tierra [2]. Cada escenario depende del desarrollo socio-económico de la sociedad y de las políticas climáticas actuales. Estas políticas son los acuerdos y tratados a nivel internacional que tienen como principal objetivo que las naciones reduzcan las

emisiones de GEI. Entre los principales tratados se encuentran el Acuerdo de París, el Protocolo de Montreal y el Protocolo de Kioto (ver apéndice B).

Se contempla un escenario de mitigación estricta (RCP2.6), dos escenarios intermedios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con altas emisiones de GEI (RCP8.5). Los números incluidos en cada nombre indican el nivel futuro del forzamiento radiativo en W/m^2 . Por lo que cuando esta cantidad es positiva, la energía incidente es mayor a la energía emitida, resultando en un calentamiento global [14]. El forzamiento radiativo da una idea de la magnitud en que factores externos han afectado el balance de energía del planeta.

El primer escenario, el RCP2.6, se interpreta como un escenario de mitigación y acorde con los objetivos del Acuerdo de París para reducir las emisiones de GEI. En este escenario, el forzamiento radiativo llegará a un nivel máximo de $3.1 W/m^2$ a mitad de siglo y disminuirá a $2.6 W/m^2$ para 2100. Las acciones de mitigación y de desarrollo limpio logran mantener el aumento de la temperatura global por debajo de $2^\circ C$ sobre los niveles pre-industriales. Para llegar a este escenario se necesitan de manera urgente estrategias de mitigación y nuevas y mejores tecnologías [2].

El RCP4.5 contempla que el nivel del forzamiento radiativo causado por las emisiones de GEI se estabilizará a $4.5 W/m^2$ para finales del siglo. Este escenario se puede interpretar como uno en el que las metas de mitigación internacionales planteadas en las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional² (CDN) se cumplen aunque no de manera estricta.

El RCP6.0 es un escenario de altas emisiones de GEI y de estabilización que contempla que el forzamiento radiativo alcanzará $6 W/m^2$ haciendo que la temperatura aumente entre $3^\circ C$ y $4^\circ C$ para finales de siglo. De igual manera, en este escenario las metas de mitigación internacionales que se encuentran en las CDN no se cumplen de manera estricta [2].

Finalmente, el RCP8.5 contempla un aumento de la temperatura entre $5^\circ C$ y $6^\circ C$ para el año 2100 debido a que el forzamiento radiativo alcanzará los $8.5 W/m^2$. Este escenario puede interpretarse como un escenario en el que no se logran instrumentar acuerdos de mitigación y se sigue un desarrollo económico altamente dependiente en combustibles fósiles [2].

En todas las trayectorias de concentración se asume que la temperatura de la Tierra aumentará en este siglo, trayendo consigo cambios sin precedentes en el clima. Por otro lado, el actual modelo económico y las actividades humanas han contribuido enormemente a la alteración de los ecosistemas; y la mayoría de los bienes comunes ambientales como los bosques, el agua, el suelo, la atmósfera y los biomas han tenido un proceso de degradación y agotamiento.

Se calcula que se han perdido cerca de 130 mil millones de hectáreas de bosque desde la década de los 90, principalmente en la regiones tropicales como el Amazonas y los bosques de África Central, debido al cambio de uso de suelo, la urbanización y la extracción de recursos [16]. Hoy en día un millón de especies se encuentran en peligro de extinción, debido a la sobreexplotación de los recursos, el cambio de uso de suelo,

²Las CDN son los compromisos asumidos por cada país para reducir sus emisiones de GEI [15].

la introducción de especies invasoras y la contaminación; en términos de seguridad alimentaria, esto pone en riesgo a la producción del 75 % de los cultivos mundiales [17]. La contaminación atmosférica hace que aproximadamente el 91 % de la población mundial viva en zonas con una mala calidad de aire [18]. Debido al agotamiento del agua se estima que para el 2025 más de 1.8 mil millones de personas vivan con la escasez de este recurso [19]. Por último, la generación de desechos y residuos (principalmente de plásticos y basura electrónica) han degradado los ecosistemas marinos y terrestres; en 2016 se generaron 260 millones de toneladas de desechos plásticos y se calcula que para 2030 esta cantidad aumente a 460 millones de toneladas; más aún, en 2010 se generaron 52 millones de toneladas de basura electrónica [20].

El cambio climático y la degradación ambiental intrínsecamente afectarán (y ya están afectando) a las sociedades, a los diferentes sectores económicos, a los bienes comunes ambientales y a todos los seres vivos del planeta [21]. En el caso de las poblaciones y los asentamientos humanos con mayor densidad de población, algunos de los principales efectos hoy en día son la inseguridad alimentaria, afectaciones por las olas de calor, registros de temperaturas extremas y de los años más calurosos durante la última década, enfermedades respiratorias debido a la mala calidad del aire, aumento de inundaciones y marejadas debido a la destrucción de los manglares, afectaciones en las economías locales y regionales, escasez de agua en zonas marginadas, entre otros [22,23]. Más aún, estas afectaciones y los futuros riesgos que el calentamiento global traerá consigo, se distribuyen de manera desigual entre las sociedades y los países, dependiendo de diversos aspectos como la locación geográfica, el desarrollo económico y los factores sociales, históricos y culturales [2].

Dado que en muchas partes del mundo se han registrado estos cambios y afectaciones durante las últimas décadas, han surgido iniciativas y diversos acuerdos para guiar el desarrollo socio-económico de las naciones y lograr una mitigación y adaptación hacia estos efectos. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, el Acuerdo de París, la Nueva Agenda Urbana, el Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres y la Agenda Addis Abeba (ver apéndice B) son algunos de los acuerdos que en conjunto forman una base para el desarrollo de políticas públicas, recomendaciones, objetivos e indicadores para los gobiernos [24].

Es importante señalar que a pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años, por las diversas organizaciones y gobiernos, muchos de los objetivos propuestos no se están cumpliendo; principalmente los relacionados con la desigualdad, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la generación de desechos y residuos sólidos. Se proyecta que estas tendencias traerán consigo consecuencias irreversibles a corto y mediano plazo en las condiciones actuales de la vida en la Tierra. Más aún, ningún país en el planeta está en camino de lograr una relación entre sus habitantes y la naturaleza de una manera sustentable. Esto significa que ninguna sociedad ha logrado cumplir las metas de bienestar y desarrollo económico y social sin comprometer a los ecosistemas y a los bienes comunes ambientales [21].

2.2. Centros urbanos

Un centro urbano es una conglomeración con una densidad de al menos 1500 habitantes por km² o al menos un 50 % de superficie de área construida por km² y una población mínima de 50,000 personas. Bajo esta descripción, un centro urbano no está delimitado geográficamente por los límites administrativos [1]. De acuerdo a la definición de las Naciones Unidas, un centro urbano es sinónimo de ciudad [25].

Los centros urbanos los focos de diversos fenómenos económicos, sociales, políticos y culturales. Históricamente, las políticas urbanas han estado caracterizadas por impulsar el crecimiento económico de las ciudades [26], ya que aquí se encuentran los principales factores de la economía: fuerza de trabajo, infraestructura, instituciones administrativas y comerciales; además de que son las principales plataformas de producción, innovación y comercio, generando empleos formales e informales [27]. El desarrollo urbano está muy ligado al desarrollo económico desde el punto de vista de los organismos internacionales, y se han creado una serie estrategias para mejorar la productividad y eficiencia de las ciudades [28].

La migración es una tendencia muy persistente en las áreas urbanas y que trae consigo desigualdades económicas y sociales [29]. Por otro lado, la pobreza urbana se ha convertido en una de las problemáticas más importantes del siglo XXI y se han realizado esfuerzos globales desde diversas organizaciones para erradicarla, creando un marco normativo para políticas de desarrollo [30]. El poder político se concentra principalmente en los centros urbanos, siendo usualmente estos las capitales administrativas de países y estados; y usualmente son el núcleo del desarrollo artístico y cultural de las sociedades [31]. Igualmente, las ciudades son generadoras de externalidades como la degradación ambiental, el consumo de la tierra sin regulación y la despoblación rural [32]. Un aspecto importante a rescatar es que las áreas urbanas constituyeron un epicentro inicial en el inicio de uno de los fenómenos mundiales más grandes de este siglo: la pandemia del Covid-19, con los primeros epicentros en ciudades como Wuhan, Milan, Madrid, Nueva York, Guayaquil y Manaos [24].

Se estima que alrededor del mundo hay más gente que se encuentra viviendo en las áreas urbanas que en las rurales. Para el año 2018, el 55 % de la población mundial se encontraba residiendo en asentamientos urbanos. Entre las regiones más urbanizadas del mundo se encuentran Norteamérica, con un 82 % de la población residiendo en áreas urbanas, América Latina y el Caribe con 81 %, Europa (74 %) y Oceanía (68 %). Por otro lado, el nivel de urbanización en Asia es del 50 %, mientras que es del 43 % en África [33]. Más aún, para el año 2018, una de cada 8 personas en el mundo residían en una de las 33 mega-ciudades (con más de 10 millones de habitantes) del mundo [34], las cuales se concentran principalmente en el llamado Sur Global³ [33].

³El Sur Global es un concepto popular que refiere a un conjunto de países heterogéneo desde el punto de vista cultural y político pero que comparten una posición estructural de periferia en el mundo moderno. El término se usa muchas veces como sinónimo de Tercer Mundo y comprende a los llamados países en vías de desarrollo [35].

Se predice que el mundo se urbanizará aún más durante la próxima década, del 56.2 % actual al 60.4 % ciento para 2030 y que para 2050 el 68 % de la población mundial residirá en áreas urbanas. La urbanización más rápida tendrá lugar en las ciudades de ingresos bajos y medio-bajos, principalmente en las zonas menos desarrolladas de África y el sureste de Asia, con tres países contabilizando el 33 % del aumento total de la población urbana: China, India y Nigeria [33].

De acuerdo con la ONU, las ciudades cubren menos del 2 % de la superficie terrestre. Sin embargo, consumen aproximadamente el 78 % de la energía del mundo, tienen una demanda del 41 % del agua mundial y generan más del 60 % de las emisiones de GEI [21, 36]. Además, las ciudades consumen la tierra a un ritmo mucho mayor que el resto de los asentamientos. La expansión desenfrenada de estas áreas tiene profundas implicaciones en el consumo de energía y de la tierra, en las emisiones de gases de efecto invernadero, en el cambio climático y en la degradación ambiental.

La enorme demanda de energía, combustibles fósiles y de recursos, la falta de espacios verdes, aunado al hecho de que muchas de las ciudades más grandes y de enorme importancia política y económica se encuentran en las costas, hace que estas estén más expuestas a sufrir los futuros efectos del cambio climático y las consecuencias de la degradación ambiental [36].

Otro de los fenómenos presente en las ciudades es la isla de calor urbana (ICU). Este es un fenómeno que ocurre en lugares donde predominan materiales como el concreto y el asfalto los cuales absorben y emiten la radiación térmica proveniente del Sol en una mayor medida haciendo que se experimenten temperaturas más altas. Este fenómeno se agrava al remover árboles y vegetación, lo que minimiza el enfriamiento natural; los edificios altos y las calles estrechas reducen la circulación de las masas de aire; y la contaminación del aire en muchas ciudades actúa como un efecto invernadero local [37, 38]. Se tienen registros de ciudades que presentan temperaturas de 5°C más que en los alrededores debido a este fenómeno. Algunos de los efectos negativos más importantes de la ICU es una mayor demanda de energía para enfriar los espacios, generando a su vez mayores emisiones de GEI y empeorando la calidad del aire, teniendo como resultado afectaciones en la salud y la calidad de vida de las personas [38].

Además, los centros urbanos son más vulnerables que los rurales debido a su alto riesgo de exposición a desastres naturales como terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones, huracanes y marejadas ciclónicas; riesgos tecnológicos y de infraestructura; y riesgos políticos, sociales y de salud pública como el terrorismo, epidemias o conflictos bélicos [39]. La intensidad de este tipo de fenómenos en las ciudades ha aumentado en las últimas décadas debido al ritmo desordenado de la urbanización, la concentración y centralización del poder económico, político y social, y la interdependencia en el complejo sistema en que un centro urbano se desarrolla [40].

Por este motivo, los centros urbanos son reconocidos como factores clave para la mitigación de los efectos del cambio climático. El rol de las ciudades se plasma entre los acuerdos ya mencionados con el objetivo de que el desarrollo socio-económico mundial reduzca la emisión de GEI y los efectos del cambio climático.

2.3. Sustentabilidad

Las ideas esenciales del concepto de la sustentabilidad han existido desde las culturas y sociedades antiguas, las cuales tenían un conocimiento y manejo de los recursos con el propósito de preservar los recursos para las generaciones futuras [41].

Una de las primeras ideas documentadas sobre el concepto tiene sus orígenes en la industria forestal alemana del siglo XVIII, donde se plantea que la mejor manera para el aprovechamiento de la madera es talando los árboles de tal forma que se le permita al bosque regenerarse o reforestarlo, y así seguir aprovechando este bien sin afectar gravemente al ecosistema [42]. En la Norte América precolombina se tienen registros de cantos sobre la conservación de la naturaleza y las consecuencias sobre un manejo desmedido de los recursos [41]. Asimismo, las culturas mesoamericanas practicaban este concepto a través de un profundo respeto a la naturaleza, de la que se consideraban parte, y no entes superiores con capacidad para dominarla y recrearla [43]. Sin embargo, la idea de sustentabilidad como un concepto que englobe a las dimensiones ecológica, económica, política y cultural es bastante reciente [44].

En 1962, Rachel Carson publicó su libro *La primavera silenciosa* donde denunció los efectos que tienen los pesticidas industriales en el medio ambiente y en la salud; popularizando así, la conciencia ecológica y ambiental en masas [45]; este es un referente del ambientalismo como una forma de conciencia y movilización de la sociedad occidental sobre las problemáticas ambientales. Asimismo, en 1972 se publicó el libro *Los límites del crecimiento* por el Club de Roma, donde se plantea una enorme preocupación sobre el crecimiento poblacional y el futuro del planeta [46]. Ambos libros, aunque de enorme relevancia ambiental y ecológica, nunca mencionan la palabra sustentabilidad.

Un punto importante para la introducción de este concepto en Latinoamérica fue la reunión de las Naciones Unidas de 1974 en Cocoyoc, México [47]. La declaración de Cocoyoc puso en cuestión la manera de satisfacer las necesidades humanas con un ambiente sometido a una gran presión. Además, consideró que los problemas para alcanzar sociedades sustentables son la industrialización desmedida, la militarización, la degradación ecológica, el crecimiento poblacional, los patrones de consumo excesivos y la prioridad a la satisfacción de intereses suntuarios [48]. Debido a esto, esta declaración es un texto con muchas aristas políticas y por muchos es considerado como un documento radical [49]. Es uno de los pocos informes de instituciones internacionales donde también se habla sobre el ecodesarrollo y hace un enorme énfasis en el ser humano y su propio desarrollo y bienestar.

Uno de los momentos claves de este concepto en la política internacional se presenta en el trabajo de la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas de 1987, también conocida como la Comisión Brundtland. En su reporte *Nuestro futuro común*, la comisión define al desarrollo sostenible como “el desarrollo que cumple con las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades” [50]. La comisión Brundtland también indicó que este desarrollo recae sobre tres áreas igualmente importantes: el

medio ambiente, la economía y la equidad social; para combatir las múltiples crisis del mundo moderno (ver figura 2.3) [51, 52].

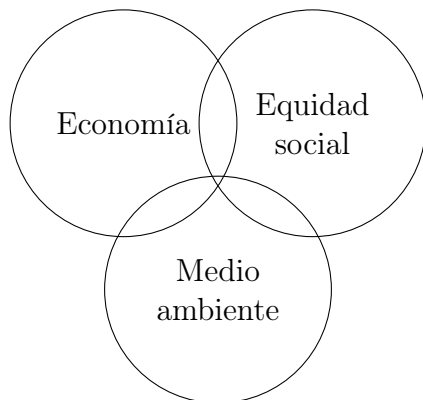


Figura 2.3: Representación de las tres dimensiones del desarrollo sostenible según la comisión Brundtland.

Desde el Informe Brundtland, los gobiernos y naciones comenzaron a crear programas y organizaciones dedicados a la evaluación del impacto ambiental y su protección. De esta manera el concepto comienza a estar muy presente en las políticas públicas como en la Declaración de Río en 1992 (ver apéndice B), dedicada a guiar el proceso de desarrollo con base en los principios del desarrollo sostenible; o los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de 2015 (ver apéndice B). El concepto ha cobrado mucha relevancia y aceptación en la política internacional y regional [52].

En la últimas décadas, el término ha estado en evolución constante y bajo diferentes críticas y redefiniciones; se ha ido divulgando y vulgarizando, y se ha adoptado y reproducido hasta formar parte del discurso político y del lenguaje común. A lo largo de las décadas, ha sido redefinido y ha adquirido diferentes connotaciones según el contexto en que se encuentre [53]. Sin embargo, las vías de transición hacia la sustentabilidad, siguen sin ser claras y muchas veces, el uso excesivo de este término lo ha llevado a pensarse como un concepto incongruente, inviable y superficial [3, 54].

Es muy importante mencionar que hoy en día existen tres conceptos relacionados con esta idea: la sustentabilidad, la sostenibilidad y el desarrollo sustentable o sostenible. Los dos primeros surgen por la traducción del término de inglés a español ya que la palabra *sustainable* puede traducirse como sustentable o sostenible. Ambas palabras también provienen de la raíz latina *sustienere* que significa sostener, mantener o sustentar; aunque la influencia del vocablo inglés también añade los significados de soportar y tolerar, por lo que se prefiere el término de sostenible en la política pública [41]. A pesar de que estos dos conceptos tienen el mismo origen, los autores hispanos (principalmente los latinoamericanos), han hecho una distinción entre ambas y actualmente se tiene una clara división entre estos términos.

Sustentabilidad, sostenibilidad y desarrollo sostenible

La definición de *desarrollo sostenible* de la comisión Brundtland, describe a un modelo en el cual las consideraciones ambientales, sociales y económicas se encuentran en la búsqueda del desarrollo y de una mejor calidad de vida [55]. Dentro de esta definición existe una contradicción en aceptar límites a los modos de vida incompatibles con los principios ecológicos pero mantiene la idea de un crecimiento y desarrollo económico sostenido [41] (el cual es fuertemente criticado por la palabra desarrollo desde una visión de sustentabilidad crítica actual). Por consiguiente, promueve la durabilidad del sistema económico actual sin hacer un cuestionamiento sobre la incompatibilidad de este con las situaciones y problemáticas sociales y ambientales: no puede existir un crecimiento económico sostenible en un planeta finito [3, 4].

El término de *sostenibilidad* (o sustentabilidad débil) se encuentra estrechamente relacionado con el de desarrollo sostenible y se encuentra muy ligado al crecimiento y al desarrollo económico. Otra característica importante ligada a este término es que en las políticas sostenibles se intentan implementar visiones y soluciones a escala global que muchas veces no son viables en la escala local. Además, tiene la idea de que el agotamiento de los recursos puede solucionarse por medio de la evolución de nuevas tecnologías [56]. Bajo este concepto se cree que el crecimiento económico es benéfico para el medio ambiente y que el deterioro medioambiental es ahora característico de los países subdesarrollados por lo que se debe impulsar el desarrollo en ellos. Se hace caso omiso de que muchas causas del deterioro al planeta, como el calentamiento global, el agotamiento de los recursos o la extinción de muchas especies es en realidad la causa del estilo de vida que mantienen los países desarrollados [57].

Existe una enorme crítica a ambos conceptos ya que están ligados al optimismo económico y tecnológico. Al definirse bajo un desarrollo que no compromete a las necesidades de las futuras generaciones, muchas veces se puede caer en la falsa idea de que el crecimiento económico va de la mano con el desarrollo humano [58]. Además, esta definición tampoco hace referencia a cuáles son las necesidades de las generaciones futuras ni quiénes son estas generaciones, no toma en cuenta cómo se miden las necesidades, que estas cambian dependiendo del contexto, ni quienes son los que deben realizar tales mediciones [59]. Por otro lado, la actual idea del desarrollo sostenible se intenta implementar “desde arriba”, desde los grupos de poder y a nivel global, sin tomar en cuenta en el debate a los grupos marginados como las mujeres, los indígenas, los negros o el Sur Global [4, 52]. Asimismo, existe una enorme crítica a que el actual sistema económico considera al medio ambiente como una externalidad, de la poca responsabilidad que tiene este sistema hacia la degradación ambiental, y del desconocimiento de las condiciones naturales, ecológicas y geográficas dentro de las cuales opera [60].

Por otra parte, el término de *sustentabilidad* se ha definirlo desde los aspectos económico, social, político, cultural, ecológico, ético e histórico, así como desde la interrelación de estas dimensiones [61]. Busca definirse tomando ideas tanto de la academia como de los saberes de los pueblos, los grupos indígenas y campesinos; todo esto, desde

una perspectiva de género. Por lo que la sustentabilidad se presenta como una oportunidad para el diálogo entre perspectivas [62]. De esta manera, la sustentabilidad es un término en constante evolución sin una única interpretación y que busca tener una nueva cultura política basada en una ética fundada en valores, creencias, sentimientos y saberes y que involucra a todos los miembros de la especie humana y a todos los seres vivos y elementos del planeta [4, 58].

Una distinción importante a los otros conceptos es que considera al sistema socio-económico como dependiente del sistema ambiental y que las actividades económicas y sociales afectan a los ecosistemas de manera que estos hacen cambios y se ajustan ocasionando a veces problemas ambientales que pueden condicionar a los asentamientos y a las actividades humanas [41].

La sustentabilidad promueve la responsabilidad colectiva, la equidad social, la gestión participativa de los bienes y servicios ecosistémicos para el bien común; la coexistencia de derechos colectivos e individuales; la satisfacción de las necesidades básicas y aspiraciones culturales de los diferentes grupos sociales; y la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras; siempre teniendo como prioridad a la justicia social: sin equidad en la distribución de los bienes y servicios ambientales no es posible construir sociedades ecológicamente sostenibles y socialmente justas [4]. Bajo esta definición, se busca que el concepto vaya mucho más allá de lo económico y lo cultural para incorporar lo epistémico y lo ontológico [62]. La sustentabilidad se denomina crítica porque busca ser integral para atender la complejidad, es por eso que se realiza desde una perspectiva interdisciplinaria y que aspira a ser transdisciplinaria. Este término es el más contemporáneo y el más adecuado para abarcar la gran problemática y complejidad de las ciudades.

Retomando las palabras de L. García, este concepto “es un ideal y también una utopía. En la actualidad no se puede llevar a cabo porque estamos en una economía con presupuestos de crecimiento ilimitado” [41]; sin embargo, muchos autores y muchas sociedades consideran que este es el ideal de sustentabilidad al que se debe aspirar.

Es importante mencionar que la sustentabilidad no es la única idea desarrollada en las últimas décadas con el fin de plantear una nueva alternativa al modelo económico actual. Conceptos como el *descrecimiento* surgido en Europa, el concepto del *buen vivir* surgido principalmente en Bolivia y Ecuador; y el *eco-socialismo* en Francia; son algunas de las muchas propuestas que buscan dar solución a la actual crisis social, económica y climática global [63].

En el presente trabajo se tomará el concepto de la sustentabilidad débil dada su relevancia y popularidad en la política pública, en las organizaciones globales y regionales, y en los acuerdos internacionales. Además, es uno de los conceptos más estudiados y que cuenta con métricas claras, objetivas y universales en muchas de sus dimensiones. Por estos motivos, es más factible realizar un estudio cuantitativo de ella. Sin embargo, es importante recalcar que la sustentabilidad fuerte es un concepto más completo y al que debería aspirarse en el futuro monitoreo de la sustentabilidad de las ciudades.

2.4. Centros urbanos sustentables

Los centros urbanos juegan un papel sumamente importante en la situación política, ambiental, social, cultural y económica global. Debido a la actual crisis ambiental, se busca implementar políticas con el fin de tener ciudades más sustentables en un rango de campos tales como el cambio climático, el crecimiento económico, la erradicación de la pobreza, la vivienda, infraestructura, servicios básicos, empleos dignos, seguridad alimentaria y salud pública [24].

La sustentabilidad urbana ha sido asumida por muchos gobiernos como un objetivo y una estrategia primordial tanto en países desarrollados como en desarrollo [64]. Los centros urbanos son clave para asegurar un futuro sustentable, ya que al estar bien planeados y administrados crean un valor económico, social y ambiental, lo que puede mejorar la calidad de vida de sus habitantes y reducir los efectos del cambio climático.

En la parte ambiental, tener una ciudad sustentable implica reconocer que los recursos naturales y los ecosistemas no son ilimitados, así como tampoco lo es su capacidad de absorción de desechos de las actividades humanas. Por este motivo, se requiere la implementación de políticas que promuevan un uso más eficiente de la energía que implique un menor consumo energético, un manejo más adecuado de residuos, una mejora del transporte, mantenimiento a las estructuras urbanas, patrones de viviendas sustentables y mejoras ambientales que contribuyan a la salud y al uso eficiente de los recursos. Estas políticas deben de ser personalizadas de acuerdo a las características de cada ciudad y al medio en donde se encuentran [64].

En el aspecto social, una ciudad sustentable bien planeada y manejada debe ayudar a combatir la pobreza y la desigualdad como su principal prioridad. Diversas propuestas orientadas a tener centros urbanos más sustentables sugieren incluir indicadores que logren ponderar la “calidad de vida” y el nivel de bienestar de los ciudadanos. Las estrategias a implementarse deben incluir el reducir la discriminación de género, fortalecer a las ONGs, ofrecer mejores oportunidades a los niños y la juventud, y aumentar el apoyo a los adultos mayores, a los migrantes y a los grupos minoritarios.

Asimismo, la sustentabilidad urbana contribuye en el aspecto económico, en el empleo productivo y permite más oportunidades económicas para todos, incluyendo a los grupos marginados y las minorías; además de que la falta de sustentabilidad genera pocas regulaciones al uso de la tierra y sistemas de transporte ineficientes, generando costos de desplazamiento y ciudades menos inclusivas [24].

Como se mencionó anteriormente, se han asumido diversos objetivos a nivel internacional durante los últimos años para asegurar un futuro más sustentable. Para el caso de las ciudades, destacan la Nueva Agenda Urbana (NUA), el ODS 11 y la dimensión urbana de los demás ODS (ver apéndice B).

En el caso de la NUA, esta reconoce el valor de las ciudades como factores para el desarrollo sustentable. Intenta promover la inclusividad y garantizar que las generaciones presentes como futuras, sin discriminación de ningún tipo, puedan tener ciudades y asentamientos humanos justos, seguros, sanos, accesibles, asequibles, resilientes y

sustentables, a fin de promover la prosperidad y la calidad de vida para todos [65].

La Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 es un plan de acción adoptado por la Asamblea General de la ONU en 2015 con 17 ODS y 169 metas dedicadas a lograr un desarrollo sostenible en el mundo. Sus principales temas de enfoque son los problemas de la pobreza, la paz, la justicia y el planeta; y ayudando principalmente a los grupos más marginados y vulnerados. En particular, el ODS 11 está enfocado a “lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” [66]. Estos objetivos se plantean lograr para el año 2030, por lo que se tiene un periodo de tiempo de menos de 10 años para tomar acciones. Sin embargo, hoy en día ninguna nación en el mundo está en camino de cumplir con todas las metas de la Agenda [67]. Los objetivos que están más lejos de cumplirse son los relacionados con la desigualdad, con la producción y consumo responsable, y con el medio ambiente: el clima y los ecosistemas marinos y terrestres [68]. Además, se proyecta que las regiones más alejadas a cumplir con estos objetivos son la África subsahariana seguida del sureste de Asia y América Latina [21, 69].

A pesar de que existe en enorme apoyo político, económico y social a lograr que los centros urbanos sean más sustentables, también debe de estar presente en el debate la opinión de que las ciudades son insustentables por definición; en particular la noción occidental de ciudad y su desarrollo tecnológico infinito que converge en la homogeneización [70]. Bajo esta idea, las condiciones sustentables se pueden mejorar sólo al dejar de lado la estructura centralizada urbana por modelos de asentamientos más dispersos y locales [71].

3 Objetivos

- Realizar un análisis de la sustentabilidad en 100 de los principales centros urbanos del mundo tomando como referencia la cantidad de la población residiendo en cada centro, y utilizando indicadores universales y objetivos. Considerando que en muchas ocasiones hay poca disponibilidad de información para el estudio de todas las dimensiones que engloban a la sustentabilidad y sin dejar de lado el análisis y las críticas al concepto mencionadas en la sección anterior.
- Realizar un estudio de los futuros niveles de exposición al cambio climático tomando el aumento de la temperatura y el cambio en la precipitación para finales de siglo en cada uno de los centros urbanos para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.
- Resaltar a las ciudades en las que convergen bajos niveles de sustentabilidad y que enfrentarán una mayor exposición al cambio climático.

4 Datos y metodología

4.1. Sobre la base de datos UCDB

El *Global Human Settlement Layer*, o Capa Global de Asentamientos Humanos en español, es un proyecto del Centro Común de Investigación (Joint Research Center) de la Unión Europea que provee información detallada sobre las poblaciones y asentamientos a través del tiempo [72].

La información es generada utilizando archivos globales de imágenes satelitales (misiones Landsat¹ y Copernicus Sentinel²), censos de población e información geográfica. Los datos son procesados de manera completamente automática y se genera información analítica, objetiva y sistemática sobre la presencia de las poblaciones e infraestructuras construidas en el mundo. El rango de datos de la GHSL cubre desde bases de datos globales (GHSL Data Package 2019), regionales (European Settlement Map), hasta datos analíticos (Urban Centre Database).

La Comisión Europea considera que el desarrollo de nuevos métodos implementados en la obtención de los datos geospaciales de poblaciones y asentamientos que sean de libre acceso, objetivos e inclusivos, es el primer paso para evaluar el impacto de la presencia humana en el planeta, el acceso a los recursos y su exposición a riesgos; así como para ofrecer un monitoreo de la Agenda del Desarrollo 2030 y sus acuerdos temáticos: el Marco de Sendai para la Reducción de Riesgo de Desastres, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el Acuerdo de París y la Nueva Agenda Urbana (ver apéndice B). Permitiendo, de esta manera, generar información útil para apoyar las decisiones de los gobiernos y las organizaciones.

En particular, el *Urban Center Database* (UCDB) o Base de Datos de los Centros Urbanos, es una de las bases de datos más completas sobre los asentamientos humanos en el mundo. Ofrece una serie de datos de las ciudades tales como su ubicación, extensión, atributos geográficos, socio-económicos, medio ambientales y de exposición a riesgos; además de la evolución temporal de algunos de estos atributos [75].

¹Es un programa estadounidense que tiene como fin el monitorear la superficie de la Tierra y proveer información sobre el derretimiento de los glaciares, el crecimiento urbano, desastres naturales y cambio en el uso de suelo [73].

²Estas misiones son desarrolladas por la Agencia Espacial Europea para monitorear la atmósfera, suelo y océanos [74].

4.1.1. Definición de centro urbano

La UCDB ofrece información de más de 10,000 centros utilizando la definición del *Grado de urbanización* propuesto por diversas organizaciones como la Unión Europea, el Banco Mundial, la FAO y ONU-Habitat, durante la tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible en octubre de 2016. Esta definición clasifica el territorio de un país entre asentamientos rurales y urbanos, utilizando atributos como la densidad y el tamaño de la población, la densidad de área construida y la continuidad espacial de las poblaciones. Esta iniciativa provee una mayor comprensión sobre la presencia humana en el planeta que puede apoyar en el proceso de toma de decisiones de los gobiernos y del monitoreo de los acuerdos internacionales utilizando métricas establecidas, procesables y objetivas [1].

Para la generación de los datos espaciales del GHSL se utiliza principalmente detección satelital para delinear la extensión física de los asentamientos humanos desde las grandes ciudades hasta los asentamientos rurales. La extensión física o área construida se obtuvo de las imágenes satelitales recopiladas por las misiones Landsat y Sentinel. La base de datos considera a las áreas construidas como “cualquier construcción sobre el suelo cuyo propósito o uso es para el resguardo de humanos, animales, cosas o para la producción de bienes y servicios; incluyendo campos de refugiados, asentamientos informales, barrios marginales y otros asentamientos y refugios temporales”. El proyecto también produce una red de información sobre la densidad de población al combinar la información espacial con la información recopilada de los censos nacionales a través de técnicas de modelado espacial [75].

La integración de la información da lugar a redes con escalas de una resolución de 1 km². Se tienen tres tipologías diferentes dependiendo de la densidad de población: centros urbanos, agrupaciones urbanas y agrupaciones rurales. Un centro urbano es una conglomeración de alta densidad de celdas contiguas de 1 km² con una densidad de al menos 1500 habitantes por km² o al menos un 50 % de superficie construida por km² y una población mínima de 50,000 personas. Los centros urbanos son las agrupaciones más densamente pobladas de las tres tipologías [1]. El proceso para delimitar cada uno de los centros urbanos se encuentra descrito en la descripción de la base de datos UCDB [75].

La base de datos GHSL utiliza celdas de cuadrícula pequeña para medir los asentamientos urbanos sin importar los límites administrativos, por lo que un centro urbano es diferente a una ciudad en términos de delimitación geográfica. De esta manera, por ejemplo, el centro urbano denotado como Ciudad de México también incluye las localidades de Ecatepec, Nezahualcóyotl, Naucalpan, Tlalnepantla, Chimalhuacan, López Mateos, Cuautitlan Izcalli, Xico, Ixtapaluca, La Cumbre, El Hielo y San José Tejamani.

4.1.2. Indicadores

Los indicadores son herramientas cuantitativas o cualitativas para visualizar objetivos, impactos y tendencias de ciertos fenómenos [76]. Están diseñados para evaluar, estimar o demostrar el progreso de variables con respecto a metas establecidas. En el caso de los indicadores de sustentabilidad, estos intentan relacionar la información ambiental, económica y la social, a fin de generar información sobre la contaminación, el deterioro del desarrollo productivo o el bienestar de la población. [77]. Los indicadores de sustentabilidad tienen el objetivo de medir la variación del sistema ambiental entre el estado inicial del sistema (dato de la realidad) y el estado de transición del sistema hacia un escenario sustentable de desempeño de la sociedad [78].

La base de datos UCDB [79] fue generada mediante la integración espacial de los centros urbanos con los datos del GHSL y otras fuentes relacionadas con cinco áreas temáticas: geográfica, socio-económica, medio ambiental, reducción de riesgo de desastres y los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS. Además, reúne información del análisis multitemporal de algunos indicadores para las épocas de 1975, 1990, 2000 y 2015.

Dada la disponibilidad de los datos, se utilizaron los indicadores de la época de 2014 y 2015. Esta época tiene la ventaja de que los indicadores para los centros urbanos de interés no tienen falta de información, por lo que se utilizaron todos a excepción de cuatro indicadores de la dimensión geográfica. A continuación se describen los diferentes indicadores utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

Dimensión geográfica

Las condiciones geográficas donde se establece un centro urbano contribuyen a definir su evolución, propiciando su expansión, calidad de vida de los habitantes o acceso a servicios. El poder describir el aspecto geográfico de cada centro urbano permite hacer un análisis de la interacción de cada ciudad con la configuración geográfica en la que se encuentre y cómo esta configuración puede afectar positiva o negativamente a la sustentabilidad de una ciudad. La dimensión geográfica de la base de datos incluye:

1. Extensión del centro urbano (AREA)

La extensión del centro urbano es un polígono que delimita al centro urbano. Se calcula usando cuatro coordenadas (dos para la latitud y dos para la longitud). Esta información se obtuvo de la base de datos GHSL y está expresada en km^2 [72].

2. Altitud (EL_AV_ALS)

La altitud afecta las actividades humanas de manera directa e indirecta. En el caso de los centros urbanos ubicados en zonas de gran altitud, estos son menos

accesibles para la distribución de bienes como el agua [80] y el transporte, además de que estas zonas traen consigo condiciones climáticas más severas y son más propensas a desastres naturales como deslizamientos de la tierra, inundaciones repentinas y terremotos. En el caso de los centros urbanos ubicados a bajas altitudes, estos están más expuestos a olas de calor intensas y al aumento del nivel del mar el cual es inducido por el cambio climático y trae consigo inundaciones y huracanes [81].

Este indicador expresa la elevación promedio estimada dentro del dominio espacial del centro urbano, la cual está expresada en metros sobre el nivel del mar (msnm). Los datos fueron recopilados de la base de datos *ALOS World 3D - 30m (AW3D30)* del Centro de Observación de la Tierra del JAXA [82].

3. Temperatura promedio (E_WR_T_14)

La temperatura puede ser considerada como una medida del estado del clima global y local. La importancia en su monitoreo recae en su aumento gradual durante las últimas décadas, lo que afecta de manera directa e indirecta a otros aspectos climatológicos [83].

Los datos de la temperatura están basados en observaciones de estaciones a nivel del suelo combinadas con interpolaciones para lograr un análisis global. Los datos no toman en cuenta efectos locales en las ciudades tales como la ICU que puede modificar la temperatura observada y percibida en una ciudad. Las temperaturas promedio se calcularon para tres intervalos de tiempo centrados en 1990, 2000 y 2015 y están expresadas en grados Celsius.

4. Precipitación promedio (E_WR_P_14)

El monitoreo de la precipitación es importante ya que el aumento de la temperatura implica un aumento de la evaporación en la atmósfera lo que modifica el ciclo hidrológico y la circulación atmosférica trayendo consigo cambios en los patrones de precipitación: tormentas e inundaciones más frecuentes e intensas y temporadas de sequía más prolongadas [84].

La precipitación promedio de la base de datos está expresada en *mm* y se calculó para tres intervalos de tiempo centrados en 1990, 2000 y 2015. Para el caso de los atributos de temperatura y precipitación se utiliza la base de datos de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad del Este de Anglia [85].

Otros indicadores geográficos que provee la base de datos pero que no se utilizaron en este trabajo son:

- Tipo de bioma
- Tipo de suelo
- Tipo de clima
- Principal cuenca hidrográfica

Dimensión socio-económica

Los indicadores socio-económicos son utilizados para evaluar las condiciones sociales, económicas y espaciales en las que se encuentra un centro urbano, lo que afecta de manera directa al medio ambiente. Las variables relacionadas con el desarrollo socio-económico son:

1. Población residente (P15), superficie construida (B15) y área construida per cápita (BUCAP15)

La información multitemporal de la población residente y del área total construida son utilizadas para evaluar la velocidad de la urbanización y están directamente relacionados con el consumo de la tierra [86]. Estos datos también permiten obtener la razón entre la población residente y el área construida: cuánto es construido por persona.

La información de la superficie construida (expresada en kilómetros), la población residente (en número de personas) y de área construida per cápita (en metros por persona), fue obtenida de las bases de datos *GHS-POP* y *GHS-BUILT* del GHSL [72].

2. Emisiones de luz nocturna (NTL_AV)

Este indicador estima la cantidad de luz nocturna emitida por el centro urbano, dicha información es útil para la delimitación de los centros, la evaluación espacial del desarrollo de las poblaciones y del bienestar humano [87].

Esta información fue recopilada de las observaciones del Earth Observation Group [88] por medio del VIRRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). En donde se tiene la radiancia media sin nubes emitida en cada centro urbano. Dicho indicador presenta el tiempo de emisión de luz nocturna promedio de una ciudad en unidades de nano-watt por estereorradián por centímetro cuadrado ($\text{nWcm}^2\text{sr}^{-1}$) filtrando radiación causada por incendios y luces efímeras.

3. PIB (GDP15_SM)

Se introduce como indicador el Producto Interno Bruto en Paridad de Poder Adquisitivo PIB PPP, lo cual mide el valor monetario de los bienes y servicios producidos en un periodo de tiempo dado. El PIB se expresa en dólares para los años 1990, 2000 y 2015. Los datos se recopilaron del *Conjunto de datos globales en cuadrícula para el Producto Interno Bruto y el Índice de Desarrollo Humano durante 1990-2015* [89].

Es importante mencionar que se reconoce ampliamente la ineficiencia de la información cuantitativa para expresar la complejidad de la situación socio-económica de un país o región. Sin embargo las estadísticas del ingreso per cápita siguen siendo el instrumento más utilizado para comparar la situación de los países del mundo [30].

4. Clasificación de ingresos ONU (INCM_CMI)

Se utilizan las métricas usadas en la clase de ingresos de la ONU World Urban Prospect 2018 [33] incorporando esta clasificación a cada centro urbano dependiendo de a qué país pertenece. En el caso de que un centro urbano pertenezca a dos países, se toma la clasificación del país donde viva la mayoría de la población.

La clasificación de ingresos está basada en la Renta Nacional Bruta RNB del año 2016. Se tienen cuatro categorías (ver figura 4.1):

- HIC (High Income Countries) - Países de ingresos altos.
- UMIC (Upper-Middle Income Countries) - Países con ingresos medio-altos.
- LMIC (Lower-Middle Income Countries) - Países con ingresos medio-bajos.
- LIC (Low Income Countries) - Países con ingresos bajos.

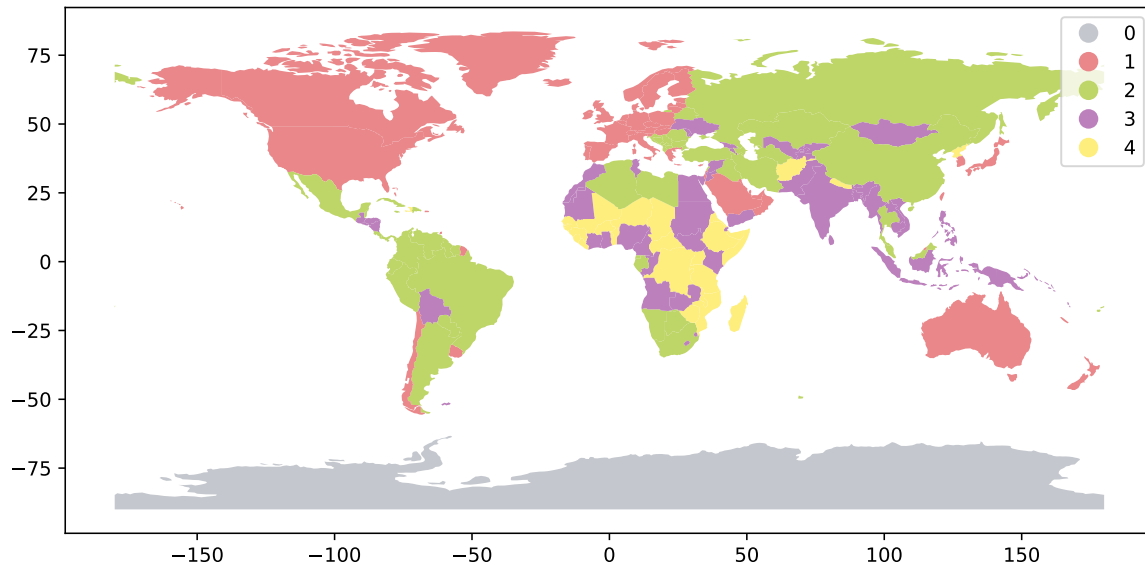


Figura 4.1: Clasificación de ingreso de acuerdo a la ONU. Donde 1 (países de ingresos altos), 2 (países con ingresos medio-altos), 3 (países con ingresos medio-bajos), 4 (países con ingresos bajos), 0 (no aplica).

5. Grupo de desarrollo (DEV_CMI)

La ONU realiza la clasificación de los grupos de desarrollo en tres categorías, colocando a Europa y Norte América (excluyendo a México), Australia, Nueva Zelanda y Japón dentro del grupo más desarrollado; mientras que a las regiones de África, Asia (excluyendo a Japón), Latinoamérica y el Caribe, así como a las regiones de Polinesia, Micronesia y Melanesia, como zonas menos desarrolladas; en el último grupo, el menos desarrollado, se encuentran 33 países de África, 9

de Asia, 4 de Oceanía y uno en el Caribe (ver figura 4.2). Al igual que en la clasificación de ingresos, en el caso de que un centro urbano pertenezca a dos países, se toma la clasificación del país donde viva la mayoría de la población.

- MDR (More Developed Regions) - Regiones más desarrolladas.
- LCD (Less Developed Regions, excluding least developed countries) - Regiones menos desarrolladas, excluyendo a las regiones con el menor desarrollo.
- LDCL (Least Developed Countries) - Regiones con el menor desarrollo.

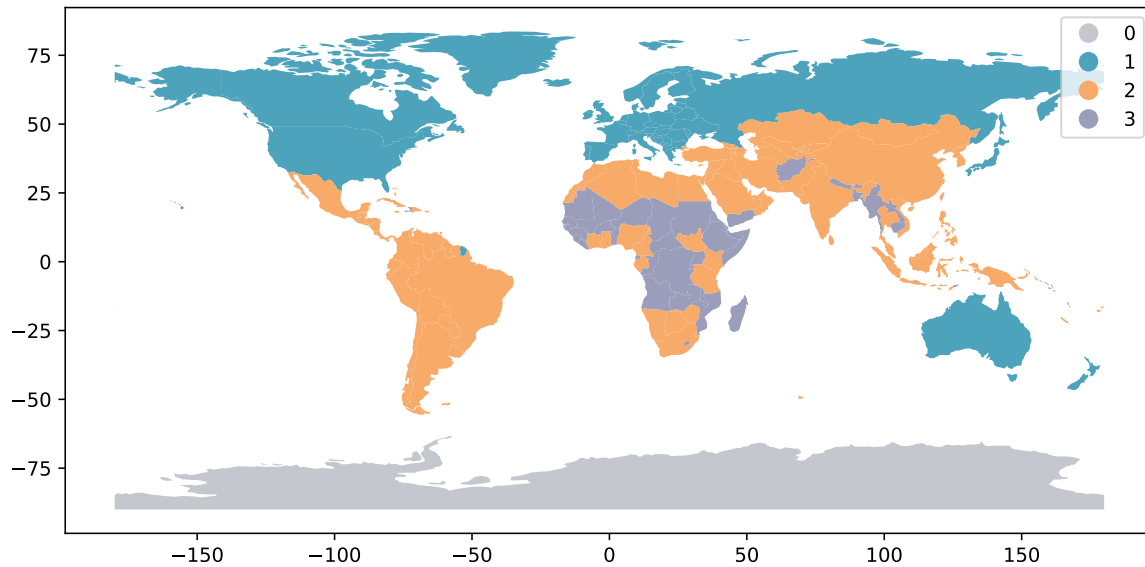


Figura 4.2: Clasificación de desarrollo de acuerdo a la ONU. Donde 1 (países más desarrollados), 2 (países menos desarrollados), 3 (países con el menor desarrollo), 0 (no aplica).

6. Tiempo de viaje a la capital (TT2CC)

Representa la distancia de viaje para alcanzar la capital (la administración central) del centro urbano. Este es un indicador importante para medir la accesibilidad o aislamiento en que se encuentra un centro.

Esta información fue recopilada por medio de la colaboración del University of Oxford Malaria Atlas Project (MAP), Google, el Centro Común de Investigación de la Unión Europea y la Universidad de Twente de Países Bajos [90]. Para obtenerlo, se utilizaron diferentes conjuntos de datos que incluían la información de calles (OpenStreetMap y Google), lagos, ríos, vías férreas, océanos, condiciones topográficas, tipo de cobertura de suelo y fronteras nacionales. El indicador se expresa en minutos.

Dimensión ambiental

La importancia de esta dimensión recae en el hecho de que a pesar de que las áreas urbanas comprenden menos del 2% de la superficie de la Tierra, son enormes fuentes de contaminantes debido a la presencia de la industria y la demanda de energía. Algunos de los problemas medioambientales están relacionados principalmente a la contaminación del suelo, aire y agua gracias al transporte, la producción industrial y el manejo inadecuado de los desechos, generando la pérdida y degradación de los espacios verdes. Los indicadores disponibles en la base de datos para esta dimensión son:

1. Espacios verdes (E_GR_AV14)

La presencia de espacios verdes (parques, jardines, bosques, techos y calles verdes) en los centros urbanos es reconocida como un componente esencial en el desarrollo del ambiente urbano. Además, la disponibilidad y mejoramiento de los espacios verdes en ciudades es contemplado en los ODS en la meta 11.7 [91].

La información de todos los indicadores de espacios verdes fue obtenida para el periodo de 1990-2015, utilizando el análisis de los compuestos reflejados en la cima de la atmósfera (Landsat annual Top-of-Atmosphere) disponibles en la plataforma de *Google Earth Engine (GEE)*. Los compuestos son creados al considerar el valor más alto del *Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación* (el pixel más verde con una resolución de 1 km²). Este índice se basa en las propiedades de reflexión diferencial de la vegetación en las porciones visible e infrarroja del espectro, y constituye un sistema de monitoreo remoto de la vegetación, tanto en tiempo como en espacio [92].

En el caso de este indicador se obtuvo el promedio de los espacios verdes localizados en las áreas urbanas para las diferentes épocas (1990, 2000 y 2014) y se encuentra expresado dentro del rango de [-1,1].

2. Extensión de espacios verdes

La extensión de áreas verdes se divide en tres indicadores los cuales son estimados para cada época de referencia dentro de los límites de cada espacio urbano:

- **Verde bajo (E_GR_AL14)** - Para espacios verdes con un índice menor a 0.1. Este corresponde a espacios rocosos, de arena, nieve o superficies impermeables como zonas con construcción.
- **Verde medio (E_GR_AM14)** - Corresponde a espacios con un índice entre 0.2 y 0.5. Se tienen espacios dedicados a actividades agrícolas y zonas de matorrales y pastizales.
- **Verde alto (E_GR_AH14)** - Con índices entre 0.6 y 0.9, corresponde a espacios con vegetación densa (bosques, jardines, parques).

Además, se tiene un indicador para expresar el área total de espacios verdes (E_GR_AT14). Estos cuatro indicadores se expresan en kilómetros cuadrados de la extensión del espacio.

3. Emisiones de CO₂ (E_EC2E_TOT) y PM_{2.5} (E_EPM2_TOT)

El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. De acuerdo con el IPCC del año 2014, las actividades industriales han aumentado la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de 280 ppm a 400 ppm [2]. Por otro lado, la materia particulada PM_{2.5} de fuentes naturales (arena y polvo) o antropogénicas (residuos de combustibles, hollín, humo) es de enorme preocupación especialmente en las aglomeraciones urbanas ya que este contaminante tiene efectos muy negativos en la salud: la exposición prolongada a estas partículas aumenta de manera considerable el riesgo de contraer enfermedades respiratorias y cardiovasculares [93].

Estos indicadores se obtuvieron de la base de datos de la Comisión Europea sobre emisiones para la investigación atmosférica mundial, la cual estima las emisiones de gases de efecto invernadero y partículas contaminantes entre los años 1970 a 2012 [94]. Los cálculos de las emisiones incluyen todas las actividades humanas excluyendo quema de biomasa, cambio de uso de suelo y silvicultura. Las emisiones se dividen entre cinco actividades humanas:

- Energía: industria de la energía.
- Residencial: energía destinada a dicho sector y desperdicios.
- Industria: refinerías, industria de la transformación, combustión para la manufactura, explotación de combustible, procesos industriales y de solventes.
- Transporte: transporte particular y público, así como aéreo, terrestre y marítimo.
- Agricultura: sectores de la agricultura y ganadería.

Dichos indicadores se presentan para las épocas de 1975, 1990, 2000 y 2012. Además, las emisiones de CO₂ se dividen en combustibles fósiles (orgánicos de ciclo no corto) y biocombustibles (orgánicos de ciclo corto).

Finalmente, se tiene un indicador de la concentración de PM_{2.5} (E_CPM2_TOT). Estos estimados están basados en los datos de la contaminación atmosférica del Global Burden of Disease 2017 (Carga Mundial de Enfermedades) [95]. La precisión de los estimados varía considerablemente entre locaciones dependiendo de la presencia y funcionamiento de estaciones de monitoreo. Los resultados se presentan para cuatro épocas de referencia (2000, 2005, 2010 y 2014) en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dimensión de riesgo de desastres

Los eventos naturales peligrosos tienen un enorme impacto en las actividades humanas: la circulación atmosférica puede generar vientos fuertes, huracanes y tormentas; las precipitaciones de gran intensidad pueden causar inundaciones; el movimiento de las placas tectónicas generan erupciones volcánicas, terremotos y tsunamis en la proximidad de las zonas costeras; las sequías y las olas de calor afectan de manera directa la seguridad alimentaria, la salud humana y tienen un fuerte vínculo con el cambio climático [96].

Los temas relacionados con desastres naturales y de exposición a riesgos en las zonas urbanas han cobrado mucho interés en las últimas décadas debido al aumento considerable en las afectaciones en las condiciones de vida de las personas y en el desarrollo social, económico y ambiental debido a estos fenómenos. Aunado a esto, en los países en desarrollo existen factores geográficos y de organización institucional que los hace particularmente vulnerables a las catástrofes y sus consecuencias. Además los desastres que afectan a estos países, pueden destruir o comprometer los recursos y las estructuras existentes, limitando su futuro desarrollo [40].

El cuantificar la exposición a estos riesgos puede ayudar a que las ciudades minimicen, eviten o se adapten al riesgo de exposición al que se enfrentan estas zonas con enormes concentraciones de población e infraestructura.

Los indicadores para esta dimensión son:

▪ Exposición a inundaciones

Muchas de las ciudades se encuentran en la proximidad de ríos, lagos y costas [97] debido a los beneficios de transporte, alimentación y comunicación. Las inundaciones son el tipo de desastre más recurrente y el que hará más evidente los efectos del cambio climático debido al cambio en los patrones de las precipitaciones y el aumento del nivel del mar. Por este motivo es importante realizar un monitoreo de las zonas urbanas más expuestas.

La información fue obtenida del *Mapa de peligro de inundaciones del mundo* [98] donde se delinearán las áreas potencialmente expuestas dentro de cada centro urbano, considerando inundaciones con al menos 1 cm de profundidad.

Los indicadores son:

- Área total expuesta a inundaciones en km^2 (EX_FD_AREA).
- Área construida expuesta a inundaciones en los años 1975, 1990, 2000 y 2015 (en km^2) (EX_FD_B15).
- Población expuesta a inundaciones en los años 1975, 1990, 2000 y 2015 (en número de personas) (EX_FD_P15).

■ Exposición a marejadas ciclónicas

Las marejadas ciclónicas son inundaciones costeras que pueden ser generadas por la presión atmosférica de las tormentas tropicales y huracanes en las superficies oceánicas. El fenómeno puede afectar a numerosas ciudades localizadas en las costas.

Esta exposición es calculada del *global GAR 15 dataset of the wave high* y del *the DEM data Mission v4.1* [99] y se tienen los indicadores de:

- Área total expuesta a marejadas ciclónicas en km² (EX_SS_AREA).
- Área construida expuesta a marejadas ciclónicas en los años 1975, 1990, 2000 y 2015 (en km²) (EX_SS_B15).
- Población expuesta a marejadas ciclónicas en los años 1975, 1990, 2000 y 2015 (en número de personas) (EX_SS_P15).

■ Exposición a sismos (EX_EQ19PGA y EX_EQ19MMI)

La evaluación de exposición a sismos es importante ya que las condiciones de vida, seguridad y el funcionamiento y estructura de un centro urbano pueden estar definidas y limitadas por la presencia de estos fenómenos, así como su frecuencia y magnitud. Representan un riesgo enorme a las condiciones de vida de las poblaciones y las consecuencias pueden ser devastadoras para los centros urbanos, además de que son un factor que muchas ciudades deben de tomar en cuenta en sus políticas de prevención a desastres y manejo de riesgos.

La información se obtiene por medio del *Global Seismic Hazard Map* en colaboración con el *Global Earthquake Model*, basados en la evaluación probabilística de la frecuencia y la magnitud de cada intensidad [100]. Los indicadores son:

- Estimado de la aceleración máxima del suelo (PGA por sus siglas en inglés), con una probabilidad del 10 % de ser excedido en 50 años (EX_EQ19PGA).
- Clasificación del riesgo sísmico en escala sismológica de Mercalli (MMI) (EX_EQ19MMI).

■ Exposición a olas de calor (EX_HW_IDX)

Las olas de calor presentan un riesgo cada vez más frecuente con el paso de los años, con temperaturas reportadas cada vez más intensas [101]. El HWMId o *Heatwave Magnitude Index*, es un índice diseñado para registrar la duración y la intensidad de la ola de calor [102]. Se define como la magnitud máxima de las olas de calor (periodo de al menos tres días consecutivos con temperatura máxima sobre un periodo de referencia de 31 días) que ocurren en un año. El indicador toma la magnitud máxima de las olas de calor en el periodo de 1980-2010.

Dimensión ODS

El ODS 11 refleja la dimensión urbana, esta enfocado en *lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*. Este objetivo contiene 10 metas, entre ellas se pretende lograr que el acceso a viviendas, servicios y transporte que sean inclusivos, asequibles y sostenibles para todos; mejorar la planeación y la gestión de las ciudades; proteger el patrimonio cultural y natural; disminuir las afectaciones económicas y sociales por desastres y por el cambio climático; proporcionar acceso a espacios verdes e implementar de políticas y planes integrados hacia la inclusión, la eficiencia de los recursos, la mitigación y adaptación al cambio climático y la resiliencia a los desastres [66]. De esta manera, los siguientes indicadores pretenden ser un apoyo para evaluar algunas de estas metas:

1. Eficiencia en el uso de la tierra (SDG_LUE9015)

Este indicador esta basado en el SDG 11.3.1 y monitorea la razón del consumo de la tierra entre la razón del crecimiento poblacional, es una manera de medir la mancha urbana [103]. Se calcula midiendo la expansión de las áreas edificadas en cada centro urbano entre 1990 y 2015, y los cambios en los recuentos de población en el mismo período. De esta forma, para obtener este indicador, se utilizan los datos de la base de datos GHSL y se obtiene del cociente:

$$\text{Uso de la tierra} = \frac{\text{Razón de consumo de la tierra anual}}{\text{Crecimiento poblacional anual}}$$

2. Acceso a espacios verdes (SDG_A2G14)

Este indicador está basado en el ODS 11.7 que pretende ponderar la cantidad de espacios abiertos en los centros urbanos como parques y jardines [91]. Está basado en el cálculo de la cantidad de personas residiendo en áreas de Verde Alto para el año de 2015, por lo que para la obtención de los datos, utiliza la misma metodología que el indicador de *Espacios Verdes* de la dimensión ambiental, tomando en cuenta la cantidad de población viviendo en esos espacios. El indicador se presenta dentro de un rango de 0-1.

3. Porcentaje de espacios verdes (SDG_OS15MX)

Este indicador también está basado en el ODS 11.7.1 y utiliza la misma metodología que el indicador anterior. Presenta un porcentaje de espacios abiertos dentro del centro urbano con un rango de 0-100.

4.2. Análisis Estadístico Multivariado

4.2.1. Análisis por componentes principales

El análisis por componentes principales tiene el propósito de reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables que se encuentran correlacionadas. Al aplicar este proceso, las nuevas componentes dejan de estar relacionadas entre sí y tienen la propiedad de que las primeras componentes representan la mayor parte de la varianza del conjunto de datos original, simplificando la complejidad del espacio muestral. [104].

Para obtener las componentes principales supongamos un conjunto de datos con n variables donde cada una de estas variables contenga m datos. De manera que se puede ver a dicho conjunto como una matriz $\mathbb{X}_{m \times n}$, donde la i -ésima columna es el vector \mathbf{x}_i que representa las observaciones de la variable i . Dicha matriz es de la forma

$$\mathbb{X}_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

Para obtener a la primera componente principal (CP) es necesario encontrar una combinación lineal de las columnas de \mathbb{X} , de la forma

$$\mathbf{z}_1 = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_{1i} \mathbf{x}_i = \mathbb{X} \mathbf{a}_1$$

Con \mathbf{a}_1 un vector de constantes, $\mathbf{a}_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1n})$ que maximiza la varianza de \mathbf{z}_1 . De tal forma que el vector $\mathbf{z}_1 = (z_{11}, z_{12}, z_{13}, \dots, z_{1n})$ sea la primera CP y las entradas de \mathbf{a} sean los coeficientes o cargas de cada componente. En notación matricial se denota como:

$$\begin{pmatrix} z_{11} \\ z_{12} \\ \vdots \\ z_{1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{1n} \end{pmatrix}$$

Dado que se busca maximizar la varianza de \mathbf{z}_1 , se debe de maximizar la expresión

$$\text{var}(\mathbf{z}_1) = \text{var}(\mathbb{X} \mathbf{a}_1) = \mathbf{a}_1^\top \text{var}(\mathbb{X}) \mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1$$

Donde \mathbb{S} es la matriz de covarianza asociada al conjunto de datos

$$\mathbb{S} = \text{var}(\mathbb{X})$$

Encontrar la combinación lineal que maximice la varianza, es equivalente a encontrar al vector \mathbf{a}_1 n -dimensional que maximice la forma cuadrática $\mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1$. Además, \mathbf{a}_1 debe de ser un vector finito, por lo que se impone la restricción de normalización $\mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 = 1$.

Para encontrar el máximo de $\text{var}(\mathbf{z}_1)$ sujeto a la restricción $\mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 = 1$, se aplica el método de multiplicadores de Lagrange, por lo que se busca maximizar la función

$$\mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1 - \lambda_1 (\mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 - 1)$$

Con λ_1 el multiplicador de Lagrange. Diferenciando con respecto al vector \mathbf{a}_1 y resolviendo para el vector nulo se obtiene que

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\mathbf{a}_1} (\mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1 - \lambda_1 (\mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 - 1)) &= 0 \\ \implies \mathbb{S} \mathbf{a}_1 - \lambda_1 \mathbf{a}_1 &= 0 \\ \implies \mathbb{S} \mathbf{a}_1 &= \lambda_1 \mathbf{a}_1 \end{aligned}$$

Por la forma de la ecuación, es claro que \mathbf{a}_1 representa a un eigenvector de la matriz \mathbb{S} , asociado a la primera CP y λ_1 es su respectivo eigenvalor [105]. Además, la varianza de la componente principal \mathbf{z}_1 es

$$\text{var}(\mathbf{z}_1) = \mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_1^\top \lambda_1 \mathbf{a}_1 = \lambda_1$$

Para encontrar a la segunda componente principal \mathbf{z}_2 que maximice ahora $\mathbf{a}_2^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_2$ y que esté sujeta a $\mathbf{a}_2^\top \mathbf{a}_2 = 1$, es necesario imponer la restricción que \mathbf{z}_1 y \mathbf{z}_2 no estén correlacionados

$$\text{cov}(\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2) = \text{cov}(\mathbb{X} \mathbf{a}_1, \mathbb{X} \mathbf{a}_2) = \mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_2^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2^\top \lambda_1 \mathbf{a}_1 = \lambda_1 \mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_2 = 0$$

Por lo que ambos vectores \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 deben ser ortonormales. Imponiendo esta nueva condición y haciendo un proceso similar al de la primera CP, tenemos que maximizar la función

$$\mathbf{a}_2^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_2 - \lambda_2 (\mathbf{a}_2^\top \mathbf{a}_2 - 1) - \phi_2 \mathbf{a}_2^\top \mathbf{a}_1$$

Con λ_2 y ϕ_2 multiplicadores de Lagrange. Diferenciando con respecto al vector \mathbf{a}_2 y resolviendo para el vector nulo se obtiene que

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\mathbf{a}_2} (\mathbf{a}_2^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_2 - \lambda_2 (\mathbf{a}_2^\top \mathbf{a}_2 - 1) - \phi_2 \mathbf{a}_2^\top \mathbf{a}_1) &= 0 \\ \implies \mathbb{S} \mathbf{a}_2 - \lambda_2 \mathbf{a}_2 - \phi_2 \mathbf{a}_1 &= 0 \end{aligned}$$

Multiplicando por \mathbf{a}_1 por la izquierda tenemos que

$$\implies \mathbf{a}_1^\top \mathbb{S} \mathbf{a}_2 - \lambda_2 \mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_2 - \phi_2 \mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 = 0$$

$$\implies 0 + 0 - \phi_2 \mathbf{a}_1^\top \mathbf{a}_1 = 0$$

Dado que \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 no están correlacionados, los primeros dos términos se anulan, y $\phi_2 = 0$, por tanto

$$\begin{aligned} \implies \mathbb{S} \mathbf{a}_2 - \lambda_2 \mathbf{a}_2 &= 0 \\ \implies \mathbb{S} \mathbf{a}_2 &= \lambda_2 \mathbf{a}_2 \end{aligned}$$

Con \mathbf{a}_2 un eigenvector de la matriz \mathbb{S} asociado a la segunda componente principal y λ_2 su eigenvalor asociado.

De esta manera se puede iterar este proceso hasta \mathbf{z}_n para encontrar a los n eigenvectores \mathbf{a}_n asociados a la matriz \mathbb{S} que representan los pesos de las nuevas componentes principales y a sus respectivos eigenvalores λ . Más aún, la varianza de cada componente principal, está dada por los eigenvalores

$$\text{var}(\mathbf{a}_i^\top \mathbb{X}) = \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Rotación de las componentes principales

El procedimiento descrito en la sección anterior indica que la primera componente es la que representará la mayor varianza de los datos. Es posible hacer una rotación de las componentes principales con el fin de obtener nuevas componentes que sean más fáciles de interpretar. Así, a pesar de que la varianza de las componentes sin rotar y las componentes rotadas se mantiene, la varianza que representa cada componente es diferente.

Existen dos tipos de rotaciones:

- *Rotación oblicua*: en este tipo de rotaciones se asume que los factores de las componentes están correlacionados entre ellos, por lo que son dependientes entre sí.
- *Rotación ortogonal*: en este tipo de rotaciones se asume que los factores no están correlacionados entre ellos (son independientes), por lo que cada factor tiene una contribución única.

La rotación ortogonal más popular es la *varimax*, este tipo de rotación maximiza la varianza en cada uno de los factores (asegurando la mínima pérdida de información) al igual que maximiza las diferencias entre los factores más grandes y más pequeños en una componente, haciendo que el peso de los factores grandes se haga más grande y el peso de los factores pequeños más pequeño. Al hacer esta rotación también es posible normalizar los factores para que todos tengan el mismo peso (*varimax normalizada*), después de hacer la rotación, son reescalados a su peso original [106].

4.2.2. Algoritmos de agrupamiento

El agrupamiento de un conjunto de datos consiste en poder formar conjuntos que sean lo más parecidos posibles. El desarrollo de las diferentes técnicas y métodos actuales recae en el hecho de definir qué significa la similitud dentro de un grupo [107]. En particular, para propósitos de este trabajo la semejanza de un grupo estará determinada por una medida de distancia.

Los algoritmos de agrupamiento basados en la distancia tienen la ventaja de que son fáciles de implementar. Estos algoritmos están divididos en dos tipos:

■ Agrupamiento no jerárquico

En este tipo de algoritmos el número de grupos se determina inicialmente, en cada iteración del algoritmo, los elementos se van agrupando por cercanía formando pequeños grupos, hasta que se han formado el número determinado inicialmente. Los algoritmos más representativos de este tipo de agrupamiento son el *k-means*, *k-medians* y *k-medoids*.

■ Agrupamiento jerárquico

En este tipo de métodos se forman grupos dentro de grupos, con una jerarquía que se representa por medio de un dendograma colocando a los grupos más pequeños y de mayor semejanza en un nivel y a los grupos grandes y con menor semejanza en otro. El agrupamiento jerárquico a su vez se divide en dos:

- Divisivo: Todos los elementos inician en un sólo grupo y el algoritmo los va separando dependiendo de la diferencia en sus características, formando así grupos más pequeños.
- Aglomerativo: Cada elemento empieza siendo su propio grupo, el algoritmo empieza a juntar a los grupos dependiendo de su nivel de semejanza.

Para el presente trabajo, se eligió el agrupamiento jerárquico aglomerativo debido a que permite hacer un análisis más adecuado para la clasificación de las ciudades.

Agrupamiento jerárquico aglomerativo

En el proceso del agrupamiento jerárquico se tienen N elementos que se desean asociar. La distancia entre cada uno de estos elementos se puede representar por medio de una matriz simétrica $\mathbb{D}_{N \times N}$ donde la entrada ij representa la distancia entre los elementos i y j . Se realiza un mapeo de las entradas de la matriz para encontrar los dos elementos más cercanos, A y B , donde la distancia entre estos dos elementos es d_{AB} . Por lo que se realiza el agrupamiento de ambos objetos en un nuevo elemento $[AB]$. Se eliminan los renglones y las columnas de la matriz con los elementos originales

y se agrega un nuevo renglón y una nueva columna con las distancias entre el nuevo grupo y los demás elementos. Se repite este proceso hasta terminar con un solo grupo. Se tienen diferentes maneras de medir la distancia que determinan la manera en que se agrupará cada elemento y subgrupo [108, 109].

- *Enlace mínimo o simple*

En este caso se toma a la mínima distancia entre un par de objetos ubicados en grupos diferentes. Este tipo de enlaces tiende a formar enlaces dispersos cuando se trabaja con conjuntos grandes de datos.

$$d_{AB} = \min_{i,j} d(A_i, B_j)$$

- *Enlace máximo o completo*

Este método funciona de una manera similar que el anterior pero se toma en cuenta la máxima distancia entre dos elementos de grupos diferentes. Este método tiende a formar grupos compactos con diámetros iguales.

$$d_{AB} = \max_{i,j} d(A_i, B_j)$$

- *Agrupamiento de enlace medio o promedio*

Toma el promedio de la distancia entre todos los pares de objetos de grupos diferentes

$$d_{AB} = \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l d_{A_i, B_j}$$

Con d_{ik} la distancia entre el objeto A_i del primer grupo y el objeto B_j del segundo grupo, k el número de objetos en el grupo A y l el número de objetos en el grupo B . El grupo que se genera se encuentra en una posición intermedia entre los grupos fusionados.

- *Método del centroide*

Consiste en medir la distancia euclidiana al cuadrado entre los dos centroides de cada grupo.

$$d_{AB} = d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

Donde \mathbf{x} y \mathbf{y} son los vectores asociados al centroide de cada grupo. Tiene la característica que el grupo con más elementos es el que domina al nuevo grupo.

- *Método de Ward*

Este método está enfocado en minimizar la pérdida de información, se enfoca en unir dos grupos que minimicen la suma de cuadrados del error (SCE)

$$SCE = \sum_j (X_j - \bar{x})^2$$

Donde X_j es la medida asociada con el j -ésimo elemento y \bar{x} es el promedio de todos los elementos. Este tipo de método tiende a formar grupos del mismo tamaño.

4.3. Análisis de los centros urbanos

Para el análisis estadístico multivariado se seleccionaron 100 de los centros urbanos con mayor población³, descartando a los centros urbanos de Seúl (Corea del Sur), Lucknow (India) y Varanasi (India) debido a la falta de información en algunos de sus indicadores. El nombre de los centros, así como las regiones administrativas que los componen (siguiendo la definición de centro urbano) se encuentran descritos en el apéndice A. La figura 4.3 muestra la ubicación geográfica de cada centro urbano incluido en el análisis.

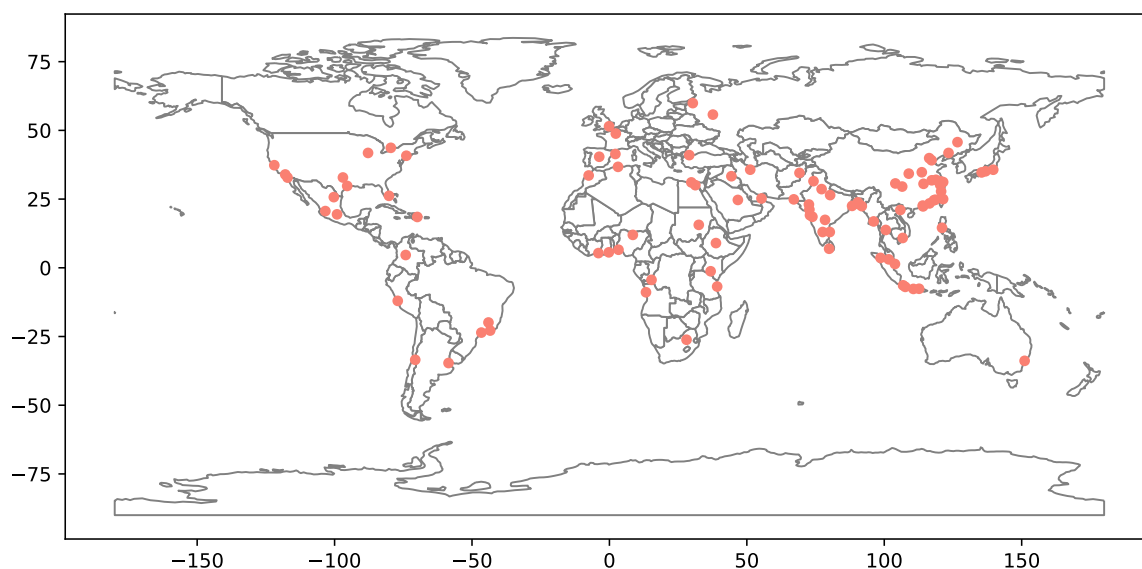


Figura 4.3: Ubicación geográfica de los 100 centros urbanos.

Estas ciudades están repartidas a lo largo de 47 países, principalmente en China (20 ciudades), India (10 ciudades), Estados Unidos (8 ciudades), Indonesia (5 ciudades) y Bangladesh (4 ciudades); a los que les siguen los países de Brasil, Japón y México con 3 ciudades cada uno.

Se seleccionaron los centros urbanos más poblados debido a que el factor de la población está estrechamente relacionado con los niveles de urbanización, además de que estos centros tienen una enorme importancia económica, política y social. Más aún, en muchos casos una mayor población también representa un agravamiento de muchas de las causas del cambio climático: más emisiones de GEI, mayor cantidad de desechos sólidos y mayor demanda de energía; así como muchas de sus consecuencias como la isla de calor urbana, y una mayor población expuesta a riesgos como inundaciones u olas de calor.

³Se tomó como referencia el tamaño de la población para el año 2015 de los centros urbanos dados por la base de datos UCDB.

Para el análisis estadístico se seleccionaron un total de 32 indicadores de las cinco dimensiones que brinda la base de datos: geográfica, socio-económica, ambiental, exposición a riesgo de desastres y ODS; para los años 2014 y 2015. Estos indicadores fueron elegidos dependiendo de la disponibilidad de la información y la calidad de los datos de cada centro urbano, además de que cada uno contribuye en alguna de las dimensiones de la sustentabilidad de manera que se puede hacer un análisis lo más completo posible. Los indicadores seleccionados se presentan en la tabla 4.1.

Cabe mencionar que para una mejor interpretación de los resultados, en los indicadores E_EC2E_TOT y E_EPM2_TOT se toma en cuenta la suma de las emisiones de combustibles fósiles (orgánicos de ciclo no corto) de los cinco sectores: industrial, residencial, transporte, energético y agrícola. Los demás indicadores se tomaron igual que los presentados en la base de datos UCDB.

Tabla 4.1: Indicadores de la UCDB utilizados para el análisis por componentes principales de los 100 centros urbanos.

Dimensión	Indicador	Año	Atributo
Geográfica	AREA		Extensión del centro urbano.
	EL_AV_ALS		Altitud promedio.
	E_WR_T_14	2014	Temperatura promedio.
	E_WR_P_14	2014	Precipitación promedio.
Socio-económica	B15	2015	Área construida.
	P15	2015	Población residente.
	BUCAP15	2015	Área construida per cápita.
	NTL_AV	2015	Tiempo promedio de emisión de luz nocturna.
	GDP15_SM	2015	PIB PPP.
	INCM_CMI		Clase de ingresos ONU.
	DEV_CMI		Grupo de desarrollo ONU.
TT2CC	2014	Tiempo de viaje a la capital del centro urbano.	
Ambiental	E_GR_AV14	2014	Verdor promedio estimado localizado en el área construida.
	E_GR_AH14	2014	Área total de Verde Alto.
	E_GR_AM14	2014	Área total de Verde Medio.
	E_GR_AL14	2014	Área total de Verde Bajo.
	E_GR_AT14	2014	Área total de Verde.

	E_EC2E_TOT	2015	Suma de las emisiones de CO ₂ de los sectores: agrícola, energético, transporte, residencial e industria.
	E_EPM2_TOT	2015	Suma de las emisiones de PM _{2.5} de los sectores: agrícola, energético, transporte, residencial e industria.
	E_CPM2_TOT	2015	Concentración total de PM _{2.5} .
Exposición a riesgos	EX_FD_AREA		Área total potencialmente expuesta a inundaciones.
	EX_FD_B15	2015	Área total construida potencialmente expuesta a inundaciones.
	EX_FD_P15	2015	Población residente potencialmente expuesta a inundaciones.
	EX_SS_AREA		Área total potencialmente expuesta a marejadas ciclónicas.
	EX_SS_B15	2015	Área total construida potencialmente expuesta a marejadas ciclónicas.
	EX_SS_P15	2015	Población residente potencialmente expuesta a marejadas ciclónicas.
	EX_EQ19PGA		Estimación de la aceleración máxima promedio del suelo (PGA) del riesgo sísmico.
	EX_EQ19MMI		Clase MMI del riesgo sísmico, derivada de la estimación de PGA.
	EX_HW_IDX		Magnitud máxima de las olas de calor.
SDG	SDG_LUE9015		Eficiencia en el uso de la tierra 1990-2015.
	SDG_A2G14	2015	Porcentaje de la población viviendo en áreas Verde Alto.
	SDG_OS15MX		Porcentaje de espacios abiertos.

Con estos indicadores se realizó un análisis estadístico similar al descrito en [110] para ciudades mexicanas con el software *Statistica*⁴. En primer lugar se hizo un análisis por componentes principales de los 100 centros urbanos para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. Se les aplicó una rotación varimax normalizada a las CP para tener una mejor distribución de la varianza. Se le dio una interpretación a cada componente, encontrando de esta manera, nuevos indicadores que describieran a cada ciudad. Posteriormente se utilizaron diagramas de dispersión para comparar las nuevas componentes y el nuevo puntaje de los centros urbanos en cada CP.

⁴<https://www.statistica.com/en/>

Se realizó el agrupamiento jerárquico aglomerativo utilizando el método de Ward y las CP con el fin de encontrar semejanzas entre los centros urbanos y formar grupos con atributos similares. Se estudió la semejanza de los grupos obtenidos desde las nuevas CP, los indicadores originales y la ubicación geográfica de cada centro urbano.

Se seleccionaron algunas CP que describieran la sustentabilidad de las ciudades. A partir de la interpretación de los valores de cada una, se creó un índice de sustentabilidad clasificando a las ciudades dependiendo si el puntaje obtenido en cada CP contribuía de manera positiva (se asignó el valor de 1) o negativa a la sustentabilidad (se asignó el valor de 0). Se obtuvo el promedio del puntaje de cada ciudad para el índice.

Posteriormente, se realizó la recopilación de las proyecciones climáticas para temperatura y precipitación para finales de siglo (se obtuvo el promedio de las variables entre 2080 y 2100) en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 del *Climate Explorer*⁵ del Servicio Meteorológico Holandés [111]. Como se mencionó en la introducción, estos escenarios representan el rango más amplio del espectro de posibilidades en cuestión de futuras afectaciones climáticas. Es importante recalcar que las proyecciones bajo estos escenarios no contemplan el fenómeno de la ICU, por lo que las temperaturas registradas a finales de siglo podrían desestimar la situación real que enfrentarían los centros urbanos. Con los datos de las proyecciones, se realizó un nuevo agrupamiento jerárquico aglomerativo tomando en cuenta el nuevo índice de sustentabilidad, el aumento de la temperatura y los cambios en la precipitación de cada ciudad para ambos escenarios, con el fin de estudiar las semejanzas de cada grupo en estas tres variables.

Finalmente, se creó un índice compuesto de temperatura y precipitación utilizando la métrica euclidiana estandarizada con el fin de estudiar los cambios climáticos en conjunto de cada centro urbano e identificar las ciudades que presentarían la mayor exposición al cambio climático. Además, se realizó un análisis entre el índice de sustentabilidad y las proyecciones climáticas de cada ciudad para identificar a los centros que tienen bajos niveles de sustentabilidad en la actualidad y que enfrentarían los mayores riesgos por el cambio climático en el futuro.

⁵https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py?id=someone@somewhere

5 Resultados y discusión

5.1. Análisis por componentes principales

Se realizó el análisis por componentes principales de manera que se redujera la dimensionalidad del conjunto de datos original y para obtener una menor cantidad de nuevas variables que pudieran explicar la mayor parte de la información.

La figura C.1 del apéndice muestra el *scree plot* de los primeros 20 eigenvalores obtenidos del análisis, ordenados de mayor a menor. Siguiendo el criterio de Keiser [112], se tomaron los eigenvalores que tuvieran un valor mayor o igual a uno, por lo que los primeros nueve fueron seleccionados. A estos se les aplicó una rotación varimax normalizada para una mejor interpretación de las componentes. Los factores resultantes de esta rotación se muestran en la tabla C.1, donde cada variable de la base de datos original tiene asignado un peso o valor de importancia para la nueva componente rotada. Para obtener la interpretación de las componentes, se tomaron en cuenta las variables con un peso igual o mayor a 0.6 y que se encuentran en la tabla C.1 marcadas en color rojo.

La tabla 5.1 muestra las nueve componentes principales obtenidas después de hacer la rotación varimax normalizada. Estas están ordenadas de manera descendente dependiendo la cantidad de varianza que representan. En total, las nueve componentes obtenidas conforman el 82.38 % de la varianza del conjunto original de datos.

Tabla 5.1: Nombre y descripción de las 9 componentes principales obtenidas del análisis estadístico, así como su correlación con los indicadores originales.

Componente	Correlación	Descripción
CP1: Grado de urbanización	AREA, P15, B15, GDP15_SM, E_GR_AM14, E_GR_AT14	Indicador del tamaño del centro urbano. Valores altos corresponden a una gran extensión geográfica, gran población y PIB alto.

<p>CP2: Emisiones de CO₂, PM_{2.5} y exposición a inundaciones</p>	<p>E_EC2E_TOT, E_CPM2_TOT, EX_FD_AREA, EX_FD_P15, EX_FD_B15</p>	<p>Indicador de emisiones y riesgo de inundaciones. Valores altos corresponden a una mayor cantidad de emisiones y que la población y el área construida del centro urbano están más expuestas a inundaciones.</p>
<p>CP3: Extensión de áreas verdes</p>	<p>E_GR_AV14, E_GR_AH14, SDG_A2G14, E_WR_P_14</p>	<p>Indicador de la presencia de áreas verdes en el centro urbano. Valores altos corresponden a la presencia de espacios verdes (jardines, bosques o parques), mayor población viviendo en estos espacios y mayores precipitaciones.</p>
<p>CP4: Nivel de desarrollo socio-económico</p>	<p>INCM_CMI, DEV_CMI, E_WR_T_14, SDG_OS15MX</p>	<p>Indicador del nivel de desarrollo del centro urbano definido por la ONU. Valores altos corresponden a un alto desarrollo socio-económico, ingresos más altos; así como lugares templados y con mayor porcentaje de espacios abiertos.</p>
<p>CP5: Riesgo de marejadas ciclónicas</p>	<p>EX_SS_AREA, EX_SS_P15, EX_SS_B15</p>	<p>Indicador de exposición a marejadas ciclónicas. Valores altos corresponden a que el centro urbano se encuentra en mayor riesgo.</p>
<p>CP6: Riesgo de sismos</p>	<p>EX_EQ19PGA, EX_EQ19MMI</p>	<p>Indicador de riesgo de sismos. Valores altos corresponden a que el centro urbano se encuentra en mayor riesgo.</p>
<p>CP7: Indicador de acceso a servicios</p>	<p>TT2CC</p>	<p>Indicador tiempo de viaje a la capital. Valores altos corresponden a que el centro urbano se encuentra más alejado de la capital administrativa del país y que tiene menos accesibilidad a este.</p>
<p>CP8: Riesgo de exposición a olas de calor</p>	<p>EX_HW_IDX</p>	<p>Indicador de exposición a olas de calor. Valores altos corresponden a centros más expuestos a olas de calor intensas.</p>
<p>CP9: Expansión de la mancha urbana</p>	<p>SDG_LUE9015</p>	<p>Indicador del crecimiento horizontal de un centro urbano con respecto al crecimiento poblacional. Valores mayores a uno corresponden a grandes expansiones geográficas.</p>

CP1: Grado de urbanización

La CP1 representa el 16.39% de la varianza del conjunto original de datos. Esta nueva componente está fuertemente correlacionada con los indicadores del conjunto original: AREA (extensión del centro urbano), P15 (población), B15 (área construida), GDP15_SM (PIB), E_GR_AM14 (extensión de zonas con Verde Medio) y E_GR_AT14 (área total de Verde). Todos los indicadores tienen coeficientes con valores positivos y dado que expresan la cantidad de población y la extensión espacial, la CP1 es una componente que se puede interpretar como el grado de la urbanización de un centro. Los valores altos de esta componente se relacionan con centros urbanos que ocupan un área geográfica extensa, tienen grandes poblaciones, generan un PIB alto y tienen zonas extensas de Verde Medio o de poca vegetación, mientras que los valores más bajos indican la situación contraria.

La importancia del monitoreo del grado de urbanización de una ciudad recae en que este fenómeno trae consigo manifestaciones económicas, sociales y ambientales, además de que está estrechamente vinculado con el valor de la sustentabilidad de un centro urbano.

En la parte económica, los centros urbanos generan un porcentaje muy alto del PIB mundial (aproximadamente el 80%) [24]. La economía informal es un sector muy importante en las ciudades. Por otro lado, mientras mayor sea el grado de urbanización se generan más desigualdades. Por ejemplo, cada vez existe una mayor cantidad de personas con menor acceso a viviendas debido a los altos precios en el centro de las urbes [113], las ciudades con una gran extensión territorial requieren un mayor uso del transporte [90]; y los precios de otros bienes y servicios son más elevados que en las zonas conurbadas y rurales, por lo que el residir en una ciudad es un privilegio económico.

En la parte social, el fenómeno de la migración juega un papel sumamente esencial, las personas que emigran a las ciudades son generadoras de empleos, además de que contribuyen con la riqueza cultural y social del centro urbano [114]. Sin embargo, la urbanización también produce desigualdades sociales, en muchas ocasiones el acceso al transporte, vivienda, espacios verdes, ingresos, bienes y servicios no es equitativo [115].

En la parte ambiental, las grandes ciudades son las principales generadoras de residuos y desechos; además, las ciudades están asociadas con un mayor consumo de energía, agua, alimentos y bienes [36]. La urbanización está relacionada con la ICU, así como con una mala calidad de aire y escasez de agua. Al igual que en los otros aspectos, la urbanización genera desigualdades ambientales, ya que muchas de las consecuencias del cambio climático afectan en diferente nivel a las poblaciones de las zonas urbanas. La calidad ambiental puede afectar de manera negativa a ciertos grupos (vulnerabilidad, riesgo, y exposición) y de manera positiva a otros (mayor acceso a espacios verdes y azules) [116].

Los procesos de urbanización, son claves para lograr ciudades más sustentables. Al tener ciudades con una mejor organización y planeación es posible reducir la brecha de desigualdad económica, social y ambiental.

CP2: Emisiones de CO₂, PM_{2.5} y exposición a inundaciones

La segunda componente está relacionada con los indicadores E_EC2E_TOT (grado de emisiones de CO₂), E_EPM2_TOT (grado de emisiones de partículas PM_{2.5}), EX_FD_AREA (área del centro urbano expuesta a inundaciones), EX_FD_B15 (área construida expuesta a inundaciones) y EX_FD_P15 (población expuesta a inundaciones). Esta componente representa el 14.29% de la varianza del conjunto de datos original.

Dado que todos los factores son positivos, los valores altos de esta componente implican que el centro urbano emite grandes cantidades de GEI, así como de partículas contaminantes, lo que deriva en una mala calidad del aire; además de que el centro urbano está muy expuesto a inundaciones. Esta relación concuerda con lo observado en la figura 4.3, se puede apreciar que la mayoría de los centros urbanos se ubican en zonas costeras, por lo que están más expuestos al aumento del nivel del mar e inundaciones. Por otro lado, muchos de los centros urbanos más importantes se establecieron cerca de ríos, lagos y costas para satisfacer su demanda de agua, accesibilidad comercial y de transporte, lo que los expone a inundaciones debido a precipitaciones intensas, fallas en el sistema de drenaje y desbordes; un ejemplo claro son las inundaciones en la Ciudad de México debido a su ubicación geográfica y fallas en el sistema de drenaje [117].

CP3: Extensión de áreas verdes

Esta componente representa el 10.89% de la varianza total de los datos y está relacionada con los indicadores E_GR_AV14 (Verde promedio en el área), E_GR_AH14 (área total de Verde Alto), SDG_A2G14 (porcentaje de la población viviendo en áreas Verde Alto) y E_WR_P_14 (precipitación promedio); cuyos factores tienen valores positivos. Por tanto, los valores altos a esta componente corresponden a centros urbanos con zonas extensas de espacios verdes (parques, jardines y bosques), una gran cantidad de personas viviendo cerca de estos espacios, así como zonas con altas precipitaciones. Son centros urbanos cuya población y gobiernos asignan un valor importante a los espacios verdes, así como a su conservación y cuidado.

Este indicador está estrechamente relacionado con el ODS 11.7¹ [91], que asigna un valor muy grande a la cantidad de espacios verdes seguros y accesibles para la población urbana. Este indicador es muy importante para la evaluación de la sustentabilidad de las ciudades ya que los espacios verdes permiten satisfacer las necesidades de esparcimiento, recreación, oportunidades de socialización y descubrimiento [118]; además de que contribuyen a mitigar efectos como la ICU y mala calidad del aire. Por último, el que un centro urbano cuente con estos espacios implica planeación e implementación de políticas públicas para su creación y mantenimiento.

¹Indicador 11.7: Proporcionar acceso universal a espacios verdes y públicos seguros, inclusivos y accesibles; en particular para mujeres y niños, personas mayores y personas con discapacidad.

CP4: Nivel de desarrollo e ingresos

La CP4 representa el 10.84 % de la varianza total del conjunto original de datos. Está muy relacionada con los indicadores INCM_CMI (clase de ingreso ONU), DEV_CMI (grupo de desarrollo ONU), E_WR_T_14 (temperatura promedio) y SDG_OS15MX (porcentaje de espacios abiertos), el cual es el factor que tiene menor peso. Los dos primeros tienen valores positivos, mientras que los dos últimos tienen valores negativos. De esta manera, los valores positivos de la CP4 corresponden a que el centro urbano está clasificado por la ONU como de alto desarrollo y de altos ingresos, además de que está caracterizado por temperaturas bajas; son centros urbanos con un alto desarrollo económico y climas templados. Por otro lado, los valores negativos corresponden a centros urbanos con temperaturas más cálidas y un desarrollo económico más bajo.

Como se mencionó anteriormente, la clasificación de la ONU coloca a Europa y Norte América (excluyendo a México), Australia, Nueva Zelanda y Japón dentro del grupo más desarrollado; mientras que a las regiones de África, Asia (excluyendo a Japón), Latinoamérica y el Caribe, así como a las regiones de Polinesia, Micronesia y Melanesia, dentro del grupo menos desarrollado. De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, la relación entre la clasificación de ingresos de un país y la temperatura encontrada en este análisis concuerda con la ubicación geográfica de estos países y su clima; esto debido a que los países más desarrollados se encuentran principalmente en regiones templadas y frías, mientras que las zonas menos desarrolladas se encuentran en las regiones más cálidas.

Esto está estrechamente relacionado con las ideas de la división Norte-Sur global, que identifican al Norte como una zona desarrollada y de altos ingresos y al Sur como una región pobre y de menor desarrollo [119]. Esta división tiene un origen histórico, económico, político, social y cultural, y trae consigo una brecha de desigualdades y una estructura de poder dominada por el Norte [120, 121].

CP5: Riesgo de marejadas ciclónicas

Esta es una componente que está relacionada con la exposición del centro urbano a marejadas ciclónicas, ya que está estrechamente ligada a los indicadores EX_SS_AREA (área total expuesta), EX_SS_P15 (población expuesta) y EX_SS_B15 (área construida expuesta) que tienen valores positivos. La componente representa el 10.11 % de la varianza total de los datos. Por lo que valores altos de esta componente corresponden con centros urbanos ubicados en zonas costeras cuya población y área construida están altamente expuestas.

La presencia de este riesgo en una ciudad es muy importante para definir la sustentabilidad de la misma. En los últimos años, como consecuencia del cambio climático, se han presentado marejadas más frecuentes y más intensas, y se proyecta que para finales de siglo esta tendencia siga aumentando [122], trayendo consigo inundaciones y daños materiales y humanos a las ciudades que se encuentran cerca de las costas.

CP6: Riesgo de sismos

La CP6 representa la exposición a sismos y terremotos y el 7.04 % de la varianza del conjunto original. Está relacionada con los indicadores EX_EQ19PGA (estimación de la aceleración máxima promedio del suelo (PGA) del riesgo sísmico) y EX_EQ19MMI (clase MMI del riesgo sísmico, derivada de la estimación de PGA). Los valores de ambos factores son positivos, por lo que valores altos de esta componente representan que el centro urbano está más expuesto a sismos de magnitudes fuertes. Los valores bajos, corresponden a centros que presentan con poca frecuencia sismos y son de baja magnitud.

El indicador está relacionado con la sustentabilidad ya que representa un riesgo hacia la infraestructura de las ciudades modificando la calidad de vida de sus habitantes y su seguridad. Esta componente limita las posibilidades de sustentabilidad ya que los centros urbanos deben adaptarse con el fin de prevenir catástrofes y pérdidas materiales y humanas. Por tanto, muchas ciudades deben de tomar en cuenta estos fenómenos en sus políticas de prevención a desastres y manejo de riesgos, así como ser resilientes a estas situaciones.

CP7: Indicador de acceso a servicios

Esta componente está relacionada con el indicador TT2CC, que indica el tiempo de viaje al centro de la capital. Es una componente que representa la accesibilidad o aislamiento que tiene un centro urbano. Los valores altos, implican que toma más tiempo llegar al centro y por lo tanto, el centro urbano se encuentra más aislado. Por otro lado, los valores bajos de esta componente implican una mayor accesibilidad a los servicios. La CP7 representa el 5.1 % de la varianza.

En muchos casos, el crecimiento de las ciudades actuales sucede a través de la conurbación de centros, en estas situaciones una planificación centralizada entra en conflicto con la situación real de un centro urbano. Esto significa que el Estado se ha mostrado con poca o nula preparación para satisfacer las necesidades de infraestructura y servicios de las zonas expandidas. Este fenómeno necesita soluciones adecuadas a las nuevas dimensiones del centro urbano y a la diversidad de demanda de servicios e infraestructuras sostenibles conforme al perfil económico, social, ambiental y financiero de cada centro [123].

Este es un indicador importante ya que está estrechamente relacionado con uno de los puntos más importantes de los ODS: “sin dejar a nadie atrás” [66] y con los temas de igualdad económica y social. Que un centro urbano tenga valores altos en esta componente indica menor acceso a servicios y oportunidades. Además, de acuerdo a la base de datos de indicador original [90], hay una mayor cantidad de personas viviendo muy alejadas de los centros en los países de ingresos bajos que en los de altos ingresos.

CP8: Riesgo de exposición a olas de calor

Esta componente expresa otro factor de riesgo ya que está estrechamente relacionado con el indicador EX_HW_IDX que representa el *Índice de la magnitud de las olas de calor* el cual tiene un valor positivo. Por lo que grandes valores de esta componente indican que la población está más expuesta a olas de calor intensas y prolongadas. Representa el 3.89 % de la varianza total.

El monitoreo de las olas de calor es muy importante ya que representan una amenaza a la salud pública, además de que en un futuro las olas de calor serán más frecuentes, prolongadas e intensas debido al calentamiento global [124], representando un particular riesgo a las poblaciones residiendo en ciudades, debido a que la ICU agravará este problema.

CP9: Expansión de la mancha urbana

Esta es la componente que representa la menor varianza de los datos, con un 3.78 %. Está relacionada con el indicador SDG_LUE9015 (eficiencia en el uso de la tierra), el cual está basado en el ODS 11.7. Este indicador se puede interpretar como la expansión de la mancha urbana ya que se define como una proporción del consumo de la Tierra y del crecimiento poblacional

$$EUT = \frac{\text{Razón de consumo de la tierra anual}}{\text{Crecimiento poblacional anual}}$$

Para el caso del indicador original, a valores mayores que 1, el centro urbano presenta un crecimiento geográfico mayor que el crecimiento de su población, lo que conlleva a una mayor mancha urbana. En el caso de valores dentro de (0,1) el centro urbano tiene un crecimiento poblacional mayor que el crecimiento geográfico lo que puede dar lugar a fenómenos como hacinamiento, pocos espacios abiertos y pocas áreas verdes. En el caso de valores negativos, se tienen casos similares pero con un decrecimiento de la población mientras que continúa la expansión del territorio o una disminución en el consumo de la tierra mientras la población sigue aumentando.

En el caso de la componente rotada, se pueden interpretar a los valores positivos como una expansión acelerada de la mancha urbana mientras que valores negativos implican que el crecimiento en la extensión geográfica de un centro urbano no es tan rápido.

El indicador es importante ya que la expansión de la mancha urbana debido a la expansión de los asentamientos urbanos de baja densidad hacia las áreas limítrofes de un centro ha generado la pérdida de suelos agrícolas y de áreas naturales además de un aumento en el consumo energético y en las emisiones de CO₂ [64].

5.1.1. Comparación entre componentes

En esta sección se presentan diferentes diagramas de dispersión. En cada diagrama se comparan dos de las nueve componentes principales, de tal forma que se pueda apreciar de manera visual el puntaje obtenido por una ciudad para ambas CP y se pueda interpretar el comportamiento general de las ciudades con respecto a dichas componentes.

Las diferentes combinaciones elegidas en los diagramas de dispersión presentados muestran la relación que existe entre las dos componentes principales graficadas y determinan si existe alguna correlación entre ellas.

CP1 contra CP2

Estas dos componentes son las que representan en conjunto la mayor varianza del conjunto original de indicadores, figuran el 31.19% de la varianza total de los datos. La figura 5.1 representa el diagrama de dispersión de la componente 1 contra la componente 2, así como la ubicación de las ciudades dependiendo de sus puntajes en estas dos CP. Los valores altos en la CP1 representan altos grados de urbanización, los valores altos en la CP2 representan altas emisiones de CO₂, PM_{2.5} y riesgo de inundaciones.

Como se observa en la figura 5.1, las ciudades se encuentran muy agrupadas, puesto que la mayoría de los centros urbanos obtuvo un puntaje entre 0 y 2 en ambas componentes. Sin embargo, existen algunos centros urbanos que tuvieron puntajes más altos en alguna de las componentes como Los Angeles, Tokio, Guangzhou y Shanghai.

Por tanto, para el cuadrante I se tienen ciudades muy urbanizadas, con una gran cantidad de emisiones y el riesgo de inundaciones es muy alto. En este cuadrante destacan las ciudades asiáticas de Guangzhou, Bangkok, Dacca, Calcuta y Nueva Delhi. Dadas los altos niveles de urbanización, emisiones y riesgos, estas ciudades deben mejorar sus esfuerzos para trasladarse al cuadrante III.

En el caso del cuadrante II, a pesar de que las ciudades son muy urbanizadas, el riesgo que presentan a inundaciones, así como sus emisiones son relativamente más bajas. En este cuadrante se tienen ciudades como Los Angeles, Tokio, Yakarta, Dallas, Ciudad de México, Houston y São Paulo.

En el cuadrante III se tienen centros urbanos como Santo Domingo, Yogyakarta, Casablanca, Hong Kong, Xiamen y Sídney. Estas son las ciudades que presentan bajos niveles de urbanización así como menor cantidad de emisiones y riesgo de inundaciones, por lo que en términos de sustentabilidad, estas son las mejor calificadas.

Finalmente, en el cuadrante IV se encuentran ciudades como Tianjin, Wuhan, Suzhou, Nankin, Hanói y Harbin, que a pesar de no ser tan urbanizadas presentan grandes niveles de emisiones de CO₂ y PM_{2.5}, así como un riesgo mayor a inundaciones.

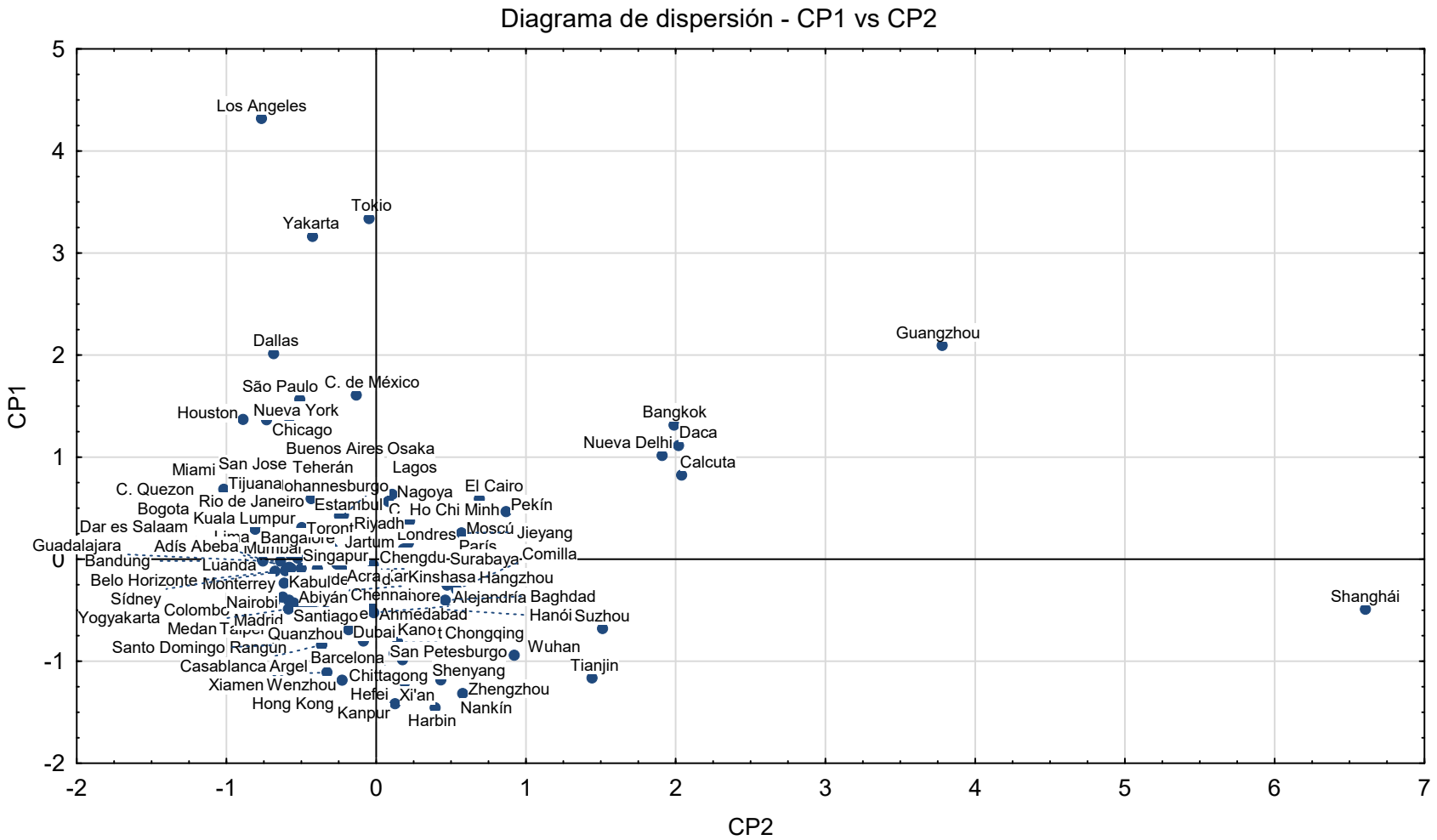


Figura 5.1: Diagrama de dispersión de la componente de nivel de urbanización contra la componente de emisión de CO₂, PM_{2.5} y riesgo de inundaciones.

CP4 contra CP3

La figura 5.2 muestra el diagrama de dispersión de la componente 4 contra la componente 3. La componente 4 indica el nivel de desarrollo socio-económico de una ciudad, donde los valores positivos indican un desarrollo alto y los negativos son indicadores de un desarrollo más bajo. Por tanto, las ciudades que se encuentren en la mitad superior del diagrama están caracterizadas por tener un desarrollo más alto que las que se encuentran en la parte inferior.

La componente 3 indica la presencia de áreas verdes en un centro urbano, los valores negativos indican la ausencia de estos, mientras que los positivos indican que el centro urbano cuenta con más espacios verdes. En este caso, las ciudades que se encuentren a la derecha del diagrama cuentan con más espacios verdes, que las ciudades ubicadas a la izquierda.

Se puede apreciar de la figura 5.2 que los centros urbanos se encuentran más dispersos en el diagrama, tomando valores de -2.5 a 2.5 para el caso de la componente 4; y de -3 a 4 para el caso de la componente 3.

En el cuadrante I están ubicadas las ciudades con una mayor cantidad de espacios verdes, así como un mayor desarrollo socio-económico. En este cuadrante se encuentran ciudades como Toronto, Chicago, Sídney, Nueva York, París, Londres y Houston. En términos de sustentabilidad, los centros urbanos ubicados en este cuadrante son los que tienen el mejor desempeño.

En el caso del cuadrante II, se encuentran ciudades como Shanghái, Madrid, Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Riyadh y Los Angeles. A pesar de que estas ciudades tienen un mayor desarrollo económico, no cuentan con suficientes espacios verdes por lo que necesitan enfocar sus políticas públicas a su implementación y mantenimiento.

En el cuadrante III, están ubicadas las ciudades que tienen el peor desempeño en ambos indicadores, ya que están caracterizadas por un bajo desarrollo socio-económico así como por una mayor ausencia de espacios verdes. Entre estas ciudades, se encuentran Dubai, Karachi, Jartum, Luanda, Guangzhou, Kinshasa y El Cairo.

Finalmente, para el cuadrante IV, se encuentran ciudades que a pesar de un bajo desarrollo, cuentan con una mayor cantidad de espacios verdes. Algunas son Comilla, Dacca, Yogyakarta, Chittagong, Calcuta y Colombo.

En el diagrama de dispersión de la figura 5.2 es claro que los centros urbanos no tienen un patrón de comportamiento y se encuentran muy dispersos. Por tanto, a pesar de que un centro urbano cuente con un mayor desarrollo socio-económico, no es una razón para que exista una mayor presencia de espacios verdes y viceversa. Por tanto, ambas componentes no están correlacionadas.

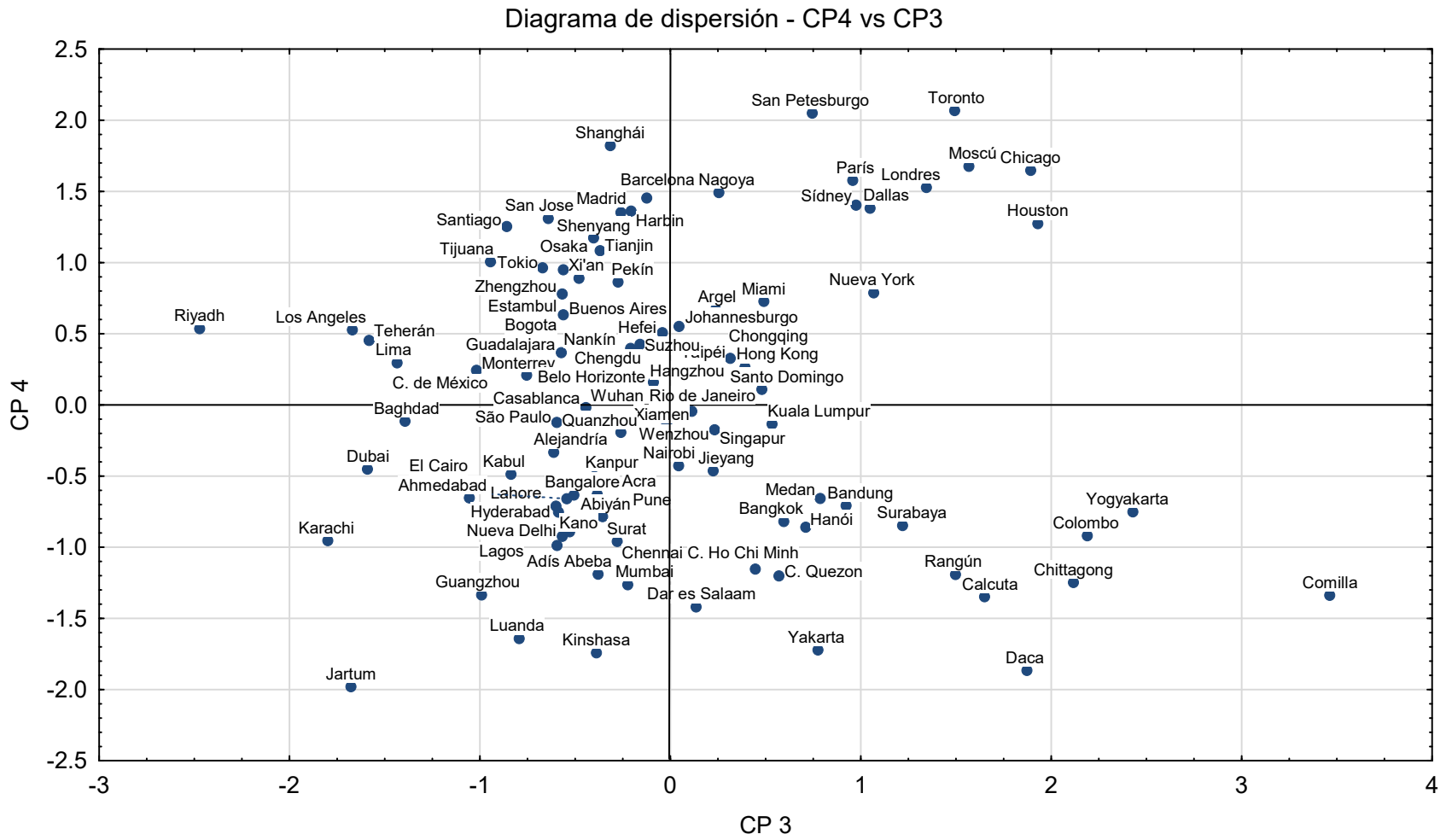


Figura 5.2: Diagrama de dispersión de la componente de nivel de desarrollo socio-económico contra la componente de extensión de áreas verdes.

CP3 contra CP1

Este diagrama (figura 5.3) de dispersión ilustra el comportamiento de las ciudades de la componente de extensión de espacios verdes contra la componente del grado de urbanización. Al igual que en el caso del diagrama anterior, los centros urbanos se encuentran muy dispersos.

En el cuadrante I se encuentran las ciudades más urbanizadas y con mayor presencia de espacios verdes. En este cuadrante se encuentran centros urbanos como Yakarta, Dallas, Houston, Chicago, Nueva York y Bangkok.

En el cuadrante II se tienen a los centros urbanos de Comilla, Chittagong, Yogyakarta, Rangún y Colombo. Estas ciudades están caracterizadas por bajos niveles de urbanización y una alta presencia de espacios verdes.

Algunas de las ciudades que componen al cuadrante III son Dubai, Karachi, Kanpur, Bagdad, Harbin y Casablanca. Tienen bajos niveles de urbanización y poca presencia de espacios verdes.

Por último, en el cuadrante IV se encuentran centros urbanos como Los Angeles, Tokio, Guangzhou, Ciudad de México, Nueva Delhi y São Paulo. En términos de sustentabilidad, las ciudades de este cuadrante son las peor calificadas, ya que los niveles de urbanización son muy altos y la cantidad de espacios verdes que tienen es muy baja.

CP9 contra CP1

El último diagrama (figura 5.4) muestra a la componente de expansión de la mancha urbana contra la componente del grado de urbanización.

En el primer cuadrante se encuentran ciudades con altos niveles de urbanización y que tienen una expansión de la mancha urbana. Las ciudades que más destacan son Ciudad de México, Chicago, Nueva York, Osaka y Guangzhou. Este cuadrante es de particular interés ya que uno de los indicadores que caracteriza a la componente 1 es la extensión del centro urbano. Por lo que estos centros a pesar de ser muy extensos, continúan su expansión geográfica consumiendo la tierra a un ritmo acelerado.

El segundo cuadrante está caracterizado por ciudades no tan urbanizadas pero que tienen una gran expansión de la mancha urbana. En este cuadrante se encuentran centros como Kanpur, Yogyakarta, Harbin, Nankin y Wuhan.

En el tercer cuadrante se tienen ciudades como Chongqing, Taipéi, Hong Kong, San Petesburgo y Santo Domingo. En términos de sustentabilidad son las mejor posicionadas ya que son centros poco urbanizados y con una baja extensión de la mancha urbana.

Finalmente, en el cuarto cuadrante se tienen ciudades muy urbanizadas pero con una extensión de la mancha urbana menos acelerada. Se encuentran los centros de Tokio, Los Angeles, Yakarta, Bangkok y São Paulo entre ellos.

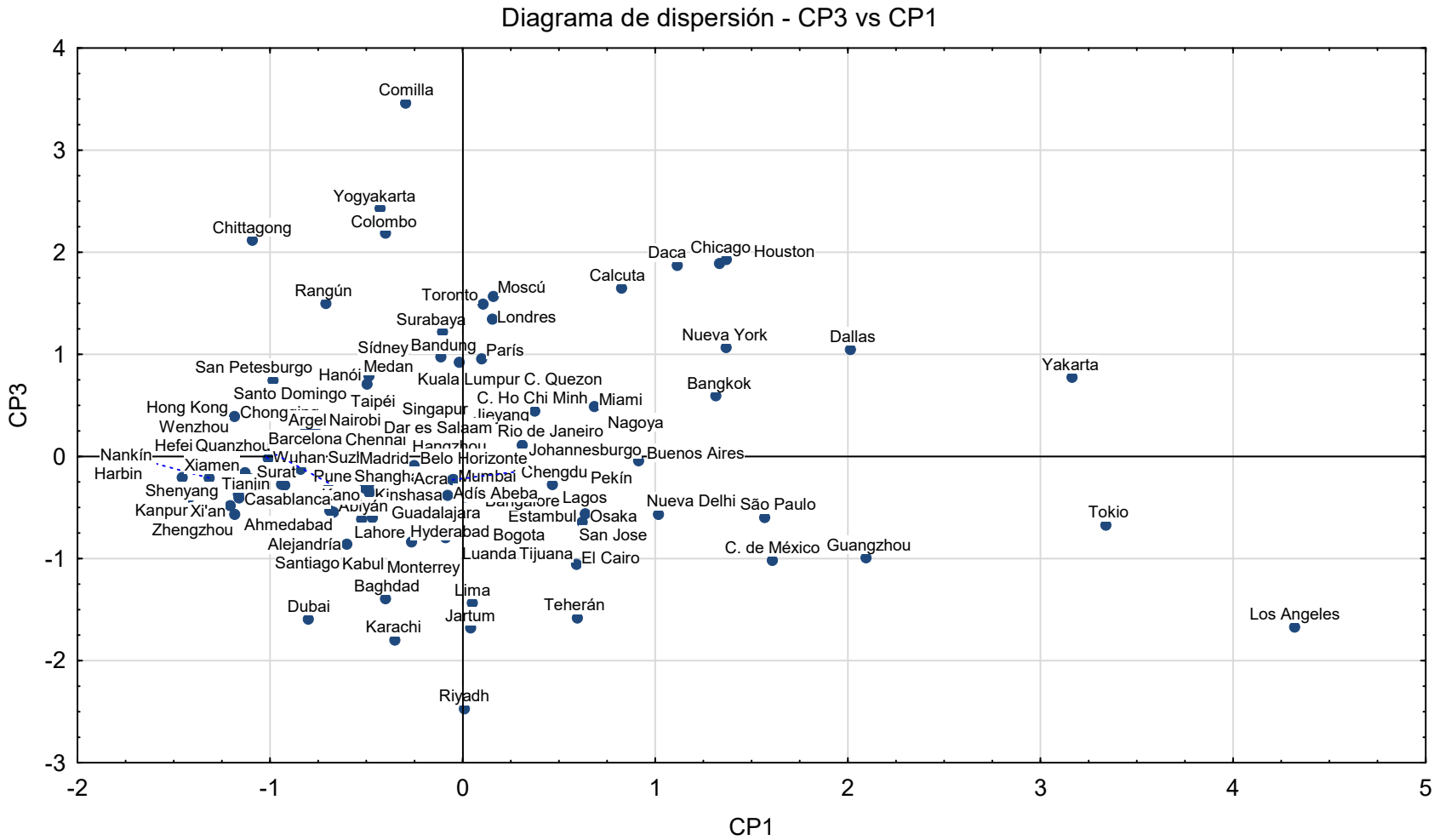


Figura 5.3: Diagrama de dispersión de la componente de extensión de áreas verdes contra la componente del grado de urbanización.

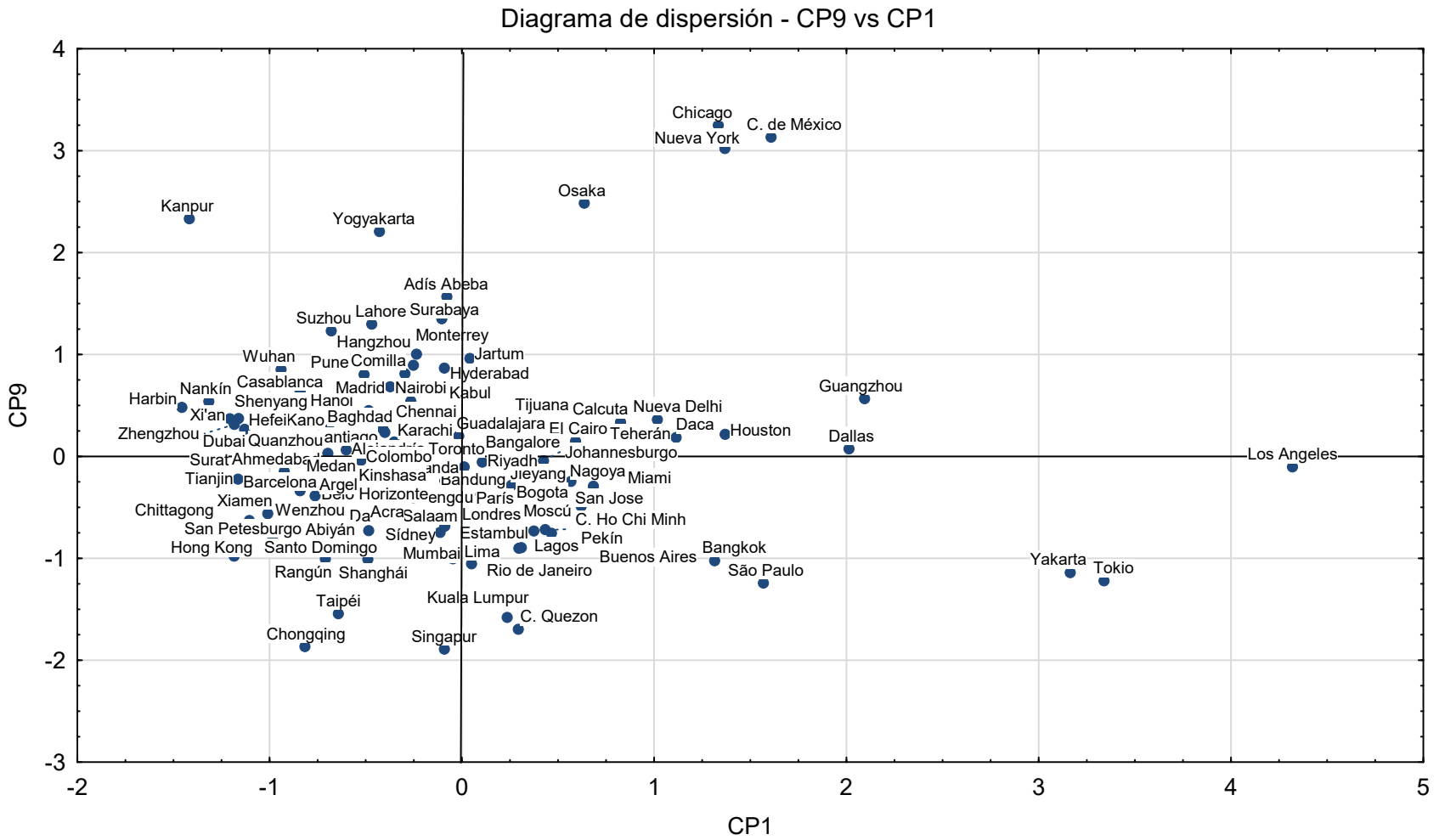


Figura 5.4: Diagrama de dispersión de la componente de expansión de la mancha urbana contra la componente del grado de urbanización.

5.2. Agrupamiento de los centros urbanos

Se realizó un agrupamiento jerárquico aglomerativo de los centros urbanos utilizando el método de Ward, ya que este lograba juntar a las ciudades en grupos definidos y de manera interpretable. Se utilizó la métrica euclidiana como medida de distancia. Para realizar el agrupamiento, se utilizó el conjunto de datos obtenido de las componentes principales. Se utilizaron todas las componentes a excepción de la 6 y la 9.

La figura 5.5 muestra el dendograma obtenido después de realizar el agrupamiento por el método de Ward. Se tomó una distancia de enlace de 15 de manera que se tuvieron 6 grupos. En términos de las componentes principales, los 6 grupos se caracterizan de la siguiente manera:

■ Grupo 1

Está conformado por los centros urbanos de Adís Abeba, Belo Horizonte, Bogotá, Ciudad de México, Guadalajara, Johannesburgo, Kabul, Nairobi y São Paulo. Este grupo se caracteriza principalmente por tener bajas emisiones, baja cantidad de áreas verdes, alto acceso a servicios y baja exposición a riesgos (inundaciones, marejadas y olas de calor).

■ Grupo 2

Este grupo está conformado por las ciudades de Alejandría, Bagdad, Casablanca, Dubai, El Cairo, Jartum, Karachi, Lima, Ruanda y Riyadh. Se caracteriza principalmente por tener bajas emisiones, ser de bajo desarrollo, tener pocos espacios verdes y alto acceso a servicios.

■ Grupo 3

El tercer grupo incluye a las ciudades de Bangkok, Calcuta, Daca, Guangzhou, Nueva Delhi y Shanghái. Son ciudades muy urbanizadas y de bajo desarrollo, con altas emisiones, pocos espacios verdes y alto riesgo a olas de calor, inundaciones y marejadas ciclónicas.

■ Grupo 4

En este grupo se encuentran los centros urbanos de Chicago, Dallas, Houston, Los Angeles, Miami, Nueva York, Osaka, San José, Tijuana, Tokio y Yakarta. Este grupo está representado por ser de alto desarrollo, ser muy urbanizado, tener bajas emisiones, así como alto riesgo a olas de calor y bajo riesgo a inundaciones y marejadas ciclónicas.

■ Grupo 5

Este es el segundo grupo más numeroso con 26 ciudades entre las que se encuentran Barcelona, Londres, Madrid, Wuhan, París, Santiago, Pekín y Toronto. Este grupo se puede interpretar como un grupo de alto desarrollo, altas emisiones, pocos espacios verdes y alto riesgo de inundaciones y de olas de calor.

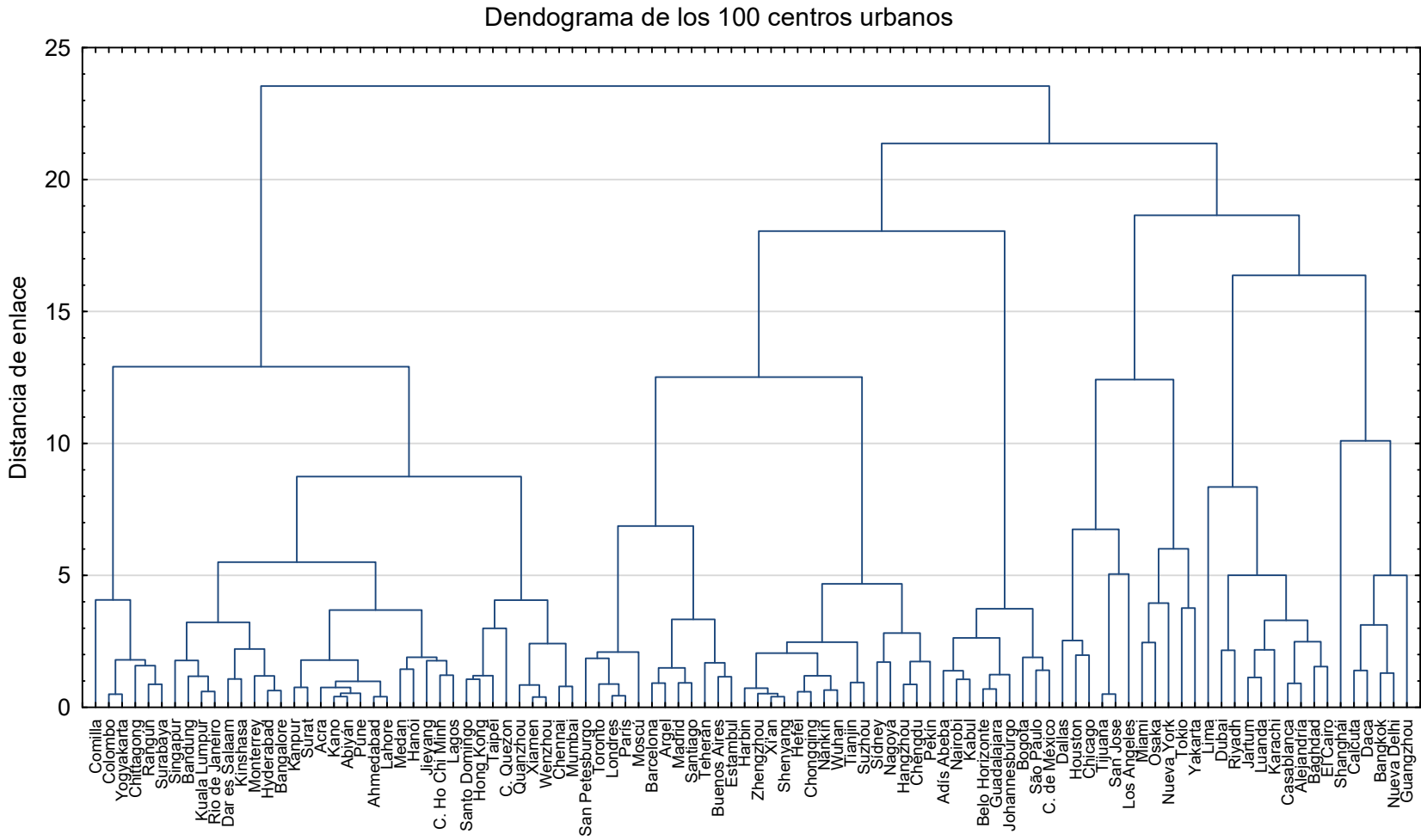


Figura 5.5: Dendrograma del análisis jerárquico aglomerativo de los 100 centros urbanos para las componentes 1-5, 7-9. Se utilizó el método de Ward así como la métrica euclidiana.

▪ **Grupo 6**

Este es el grupo más numeroso, con 36 centros urbanos, entre los que se encuentran Hong Kong, Monterrey, Mumbai, Singapur, Santo Domingo, Lahore, Dar es Salaam y Río de Janeiro. Se caracteriza principalmente por ser de bajo desarrollo y baja urbanización, por tener poco acceso a servicios, pocos espacios verdes, bajas emisiones, así como bajo riesgo a olas de calor e inundaciones.

La tabla 5.2 muestra un resumen de las características de los grupos para cada componente principal.

Grupo	CP4	CP3	CP7	CP1	CP2	CP5	CP8
5	Verde	Rojo	Amarillo	Amarillo	Rojo	Verde	Rojo
4	Verde	Amarillo	Rojo	Rojo	Verde	Amarillo	Amarillo
1	Amarillo	Rojo	Verde	Amarillo	Verde	Verde	Verde
6	Rojo	Amarillo	Rojo	Verde	Verde	Amarillo	Verde
2	Rojo	Rojo	Verde	Amarillo	Verde	Amarillo	Rojo
3	Rojo	Amarillo	Amarillo	Rojo	Rojo	Verde	Rojo

Tabla 5.2: Tendencia de sustentabilidad de los grupos de acuerdo a las componentes principales. Verde indica que la mayoría de las ciudades tienen características positivas, rojo indica características negativas y amarillo indica que la tendencia en el grupo no es clara.

Los grupos de la tabla se ordenaron de acuerdo al nivel de desarrollo, colocando a los grupos 4 y 5 (alto desarrollo) en la parte superior y a los grupos 2, 3 y 6 (de bajo desarrollo) en la parte inferior. Se puede apreciar que ningún grupo tiene la componente de espacios verdes marcada como positiva. Tampoco existe una relación entre componentes clara. Por ejemplo, no existe un patrón entre el nivel de desarrollo socio-económico de un centro urbano y los factores de riesgo CP2, CP5 y CP8 (ubicados en las columnas de la derecha de la tabla), el grado de emisiones (CP2), de urbanización (CP1), o de acceso a servicios (CP7). Las componentes de exposición a riesgo tampoco están relacionadas con la cantidad de emisiones o de espacios verdes de un grupo.

La figura 5.6 muestra la distribución geográfica de cada uno de los grupos. A partir de este mapa se puede notar que el grupo 4 está ubicado principalmente en Estados Unidos y Japón. El grupo 5 está conformado en su mayor parte por la región de Europa, el norte de China y Sídney. El grupo 6 se encuentra en latitudes medias, sus ciudades se ubican principalmente en India, el sur de China y Nueva Zelanda. El grupo 3 está ubicado en el sur de Asia, en los países de Tailandia, India, Bangladés y el sur de China. Finalmente los grupos 1 y 2 se encuentran distribuidos principalmente en las regiones de Latinoamérica y África.

La distribución de los grupos que se muestra en la figura 5.6, este mapa y los resultados de la tabla 5.2 implican que la agrupación encontrada en el análisis está estrechamente relacionada con la ubicación geográfica de las ciudades, más que con las condiciones socio-económicas o ambientales del lugar.

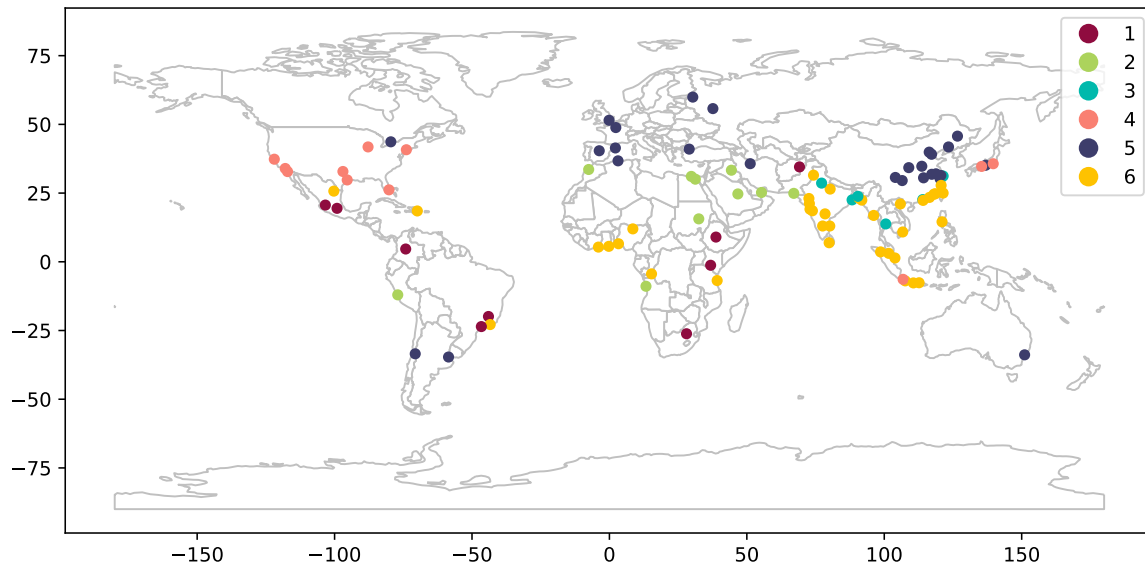


Figura 5.6: Ubicación geográfica de los centros urbanos por grupos.

Para hacer un análisis más detallado de las características que tiene cada grupo, se analizaron los 32 indicadores originales de la base de datos UCDB. Para cada grupo se obtuvo el promedio en cada indicador. Estos promedios se muestran en la tabla 5.3. Con estos datos, se tienen características más precisas en cada grupo.

■ Grupo 1 ●

Este grupo se destaca por tener ciudades que se ubican en las altitudes más grandes, la altitud promedio es mayor a la de los otros grupos por un factor de 10. Es uno de los grupos con menos espacios de Verde Alto, además de que es el único grupo que no está expuesto a marejadas ciclónicas y el que tiene una menor exposición a inundaciones, ya que sus ciudades no se ubican en las costas, lo que concuerda con los valores de la altitud. Este grupo, junto con el grupo 6, tiene la menor cantidad de emisiones de CO_2 . Además que es uno de los grupos con un menor desarrollo socio-económico.

■ Grupo 2 ●

El grupo 2 se distingue por tener el valor más alto en el indicador de tiempo de luz nocturna, son centros urbanos pequeños comparados con el tamaño de las ciudades de los demás grupos, además de que el cociente del área construida per cápita es menor. Las ciudades de este grupo son las que se encuentran mejor conectadas y las que cuentan con más accesibilidad a los servicios. Este grupo es el que tiene menor cantidad de porcentaje de Verde Medio, así como una menor cantidad de precipitaciones. También tiene una menor concentración de $PM_{2.5}$ y se caracteriza por tener los niveles más bajos en el uso eficiente de la tierra y de acceso a espacios verdes.

■ Grupo 3 ●

Este grupo se encuentra en las menores altitudes. Las ciudades que lo conforman tienen la mayor cantidad de población y un desarrollo socio-económico bajo. Es el grupo que tiene una mayor cantidad de emisiones de CO₂ y de emisión y concentración de partículas PM_{2,5}, además es el grupo con la mayor población y área construida expuesta a inundaciones.

■ Grupo 4 ●

El grupo 4 se caracteriza por tener ciudades con la mayor extensión geográfica y la mayor área construida per cápita. Es el grupo con el mayor PIB y el mayor desarrollo socio-económico. Este grupo es el que tiene un mayor tiempo de viaje al centro de la ciudad lo que concuerda con su gran extensión geográfica. También está caracterizado por tener la mayor extensión de Verde Alto, Verde Medio y Verde Total.

■ Grupo 5 ●

De acuerdo con la tabla, este grupo presenta la menor temperatura promedio. Es el segundo grupo con menor población y es el segundo con una mayor clase de ingreso y grupo de desarrollo de acuerdo a la ONU.

■ Grupo 6 ●

El último grupo está caracterizado por tener la mayor cantidad de precipitaciones así como las temperaturas más altas. Este grupo es el que cuenta en promedio con la menor población y la menor cantidad de área construida y área construida per cápita. Está caracterizado por tener el PIB y la clase de ingresos de la ONU más bajo.

Las características de cada grupo con respecto a los indicadores originales hacen evidente la relación que se obtuvo del análisis por componentes principales. Por ejemplo, el grupo 4 presenta el mayor PIB así como la mayor extensión geográfica del centro urbano, indicadores relacionados con la CP1 del grado de urbanización. Por otro lado el grupo 3 tiene la mayor cantidad de emisiones de CO₂ y de partículas PM_{2,5}, así como el mayor riesgo a inundaciones; estos tres indicadores conforman a la CP2.

Los grupos obtenidos del análisis jerárquico aglomerativo presentan características muy diversas desde el punto de vista de las componentes, y sorprendentemente, se encuentra una ubicación geográfica definida en la mayoría de los grupos.

Tabla 5.3: Promedio de los indicadores originales para cada grupo.

Indicador	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
AREA	947.7	829.5	3507.8	3816.5	1181.5	954.2
EL_AV_ALS	1742.0	147.4	44.8	92.6	183.6	153.3
E_WR_P_14	1050.3	148.9	1459.3	1090.3	841.8	1588.4
E_WR_T_14	17.69	24.5	24.3	18.2	13.9	25.7
B15	538.30	386.0	1536.9	2587.9	700.7	372.4
P15	8.2×10^6	8.0×10^6	2.5×10^7	1.3×10^7	7.6×10^6	7.3×10^6
BUCAP15	60.9	55.0	60.6	292.6	94.7	55.1
NTL_AV	31.3	46.1	17.6	31.1	36.0	19.0
GDP15_SM	1.2×10^{11}	8.4×10^{10}	2.9×10^{11}	3.7×10^{11}	1.3×10^{11}	7.8×10^{10}
INCM_CMI	2.4	2.6	2.5	3.8	3.3	2.3
DEV_CMI	1.8	1.8	1.8	2.9	2.3	1.9
TT2CC	149.4	97.9	465.0	1103.7	328.3	472.5
E_GR_AV14	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.4
E_GR_AH14	196.5	80.9	962.9	1260.0	280.8	380.3
E_GR_AM14	614.3	228.4	1440.7	2210.8	693.3	515.3
E_GR_AL14	132.1	516.5	172.5	335.0	100.1	53.2
E_GR_AT14	942.9	825.7	3491.6	3805.7	1179.6	948.7
E_EC2E_TOT	1.5×10^7	2.9×10^7	1.6×10^8	6.6×10^7	4.0×10^7	1.5×10^7
E_CPM2_TOT	1.8×10^4	6.4×10^3	1.9×10^5	1.4×10^4	2.4×10^4	1.7×10^4
E_CPM2_T14	21.2	44.1	60.3	13.3	41.5	34.0
EX_FD_AREA	42.4	264.0	2454.5	218.5	264.8	180.1
EX_FD_B15	29.2	103.5	1058.7	138.9	148.6	54.6
EX_FD_P15	5.4×10^5	2.0×10^6	1.6×10^7	8.4×10^5	1.5×10^6	1.0×10^6
EX_SS_AREA	0.0	29.0	503.0	1055.9	49.8	220.2
EX_SS_B15	0.0	12.8	232.7	723.7	29.4	84.2
EX_SS_P15	0	5.3×10^5	3.0×10^6	4.2×10^6	1.2×10^5	1.9×10^6
EX_EQ19PGA	0.15	0.10	0.08	0.15	0.14	0.12
EX_EQ19MMI	4.6	3.6	4.0	3.5	4.1	4.1
EX_HW_IDX	10.6	29.1	7.9	13.4	11.8	9.7
SDG_LUE9015	0.88	0.43	0.59	1.15	0.59	0.73
SDG_A2G14	0.049	0.016	0.165	0.200	0.103	0.167
SDG_OS15MX	51.7	63.6	58.2	39.2	46.9	61.1

5.3. Evaluación de la sustentabilidad

Para la creación del índice de sustentabilidad se seleccionaron las componentes 1-5 y 7-9, a las cuales se les asignó una variable binaria de manera que cuando la CP de una ciudad tuviera un valor que se interpretara en beneficio de la sustentabilidad se le asignaba un valor de 1, en caso contrario se le asignaba un valor de 0. Al obtener el promedio de estas variables binarias para cada ciudad, se creó un índice normalizado de la sustentabilidad para los centros urbanos.

Las condiciones para que cada componente contribuyera de manera positiva en el índice de sustentabilidad y se le asignara un valor de 1 se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Condiciones de cada componente para contribuir de manera positiva en el índice de sustentabilidad.

Componente	Contribución a la sustentabilidad
CP1 <0	El centro urbano está menos urbanizado, por lo que hay menos población y construcciones. Fenómenos como el hacinamiento, desigualdad económica y social, emisiones, mancha urbana, y contaminación están presentes en menor medida.
CP2 <0	El centro urbano tiene menor cantidad de emisiones de CO ₂ , PM _{2.5} , además de estar menos expuesto a inundaciones.
CP3 >0	Mayor presencia de áreas verdes en el centro urbano lo que beneficia a la población en la cuestión social y de esparcimiento, además de que reduce efectos como la ICU.
CP4 >0	El desarrollo de una ciudad generalmente contribuye a la sustentabilidad, ya que de acuerdo a [65] el contar con mejor tecnología y recursos puede beneficiar en el aspecto ambiental, económico y social.
CP5 <0	Los valores negativos implican que el centro urbano se encuentra en menor riesgo de marejadas ciclónicas.
CP7 <0	El centro urbano presenta una mayor accesibilidad a los servicios.
CP8 <0	El centro urbano se encuentra menos expuesto a olas de calor intensas.
CP9 <0	El ritmo de crecimiento de la mancha urbana es bajo, por lo que hay un consumo de la tierra más eficiente.

La tabla 5.5 muestra el puntaje obtenido en el índice de sustentabilidad para cada uno de los 100 centros urbanos. El valor más alto es de 1 y correspondería a que una ciudad tiene en todas las CP atributos que benefician a la sustentabilidad. Por otro lado, el valor más bajo es 0 y corresponde a que en ninguna de las componentes analizadas, la ciudad tuvo valores que contribuyeran a la sustentabilidad.

Las ciudades mejor calificadas son Bandung (Indonesia), Johannesburgo (Sudáfrica), Belo Horizonte (Brasil), Argel (Argelia) y Sídney (Australia); que obtuvieron un puntaje de 0.875. En segundo lugar se encuentran ciudades como Toronto (Canadá), Bogotá (Colombia), Nairobi (Kenia), San Petesburgo (Rusia) y Hong Kong con un puntaje de 0.75.

Por otro lado, Nueva Delhi (India), Osaka (Japón) y Kanpur (India) se encuentran en penúltimo lugar con un puntaje de 0.125, lo que indica que solo una de las 8 componentes analizadas tiene atributos en beneficio de la sustentabilidad. Finalmente, la ciudad de Guangzhou (China) no tuvo ninguna componente que contribuyera a la sustentabilidad, por lo que tuvo un valor de 0 y se ubica en último lugar. Cabe mencionar que esta ciudad es la que cuenta con la mayor población de todas las analizadas en este trabajo.

En la figura 5.7 se muestra la clasificación de los centros urbanos de acuerdo con el puntaje obtenido en el índice de sustentabilidad. La mayoría de los centros urbanos con valores bajos y medios en el índice (colores rojo, naranja y amarillo) están ubicados en la región de Asia, donde la mayoría son ciudades pertenecientes a China e India. Por otro lado, los valores altos del índice se encuentran en ciudades ubicadas en su mayor parte en América, Europa y Oceanía. En el caso de África, las ciudades analizadas tienen en su mayor parte, puntajes altos y medios del índice de sustentabilidad.

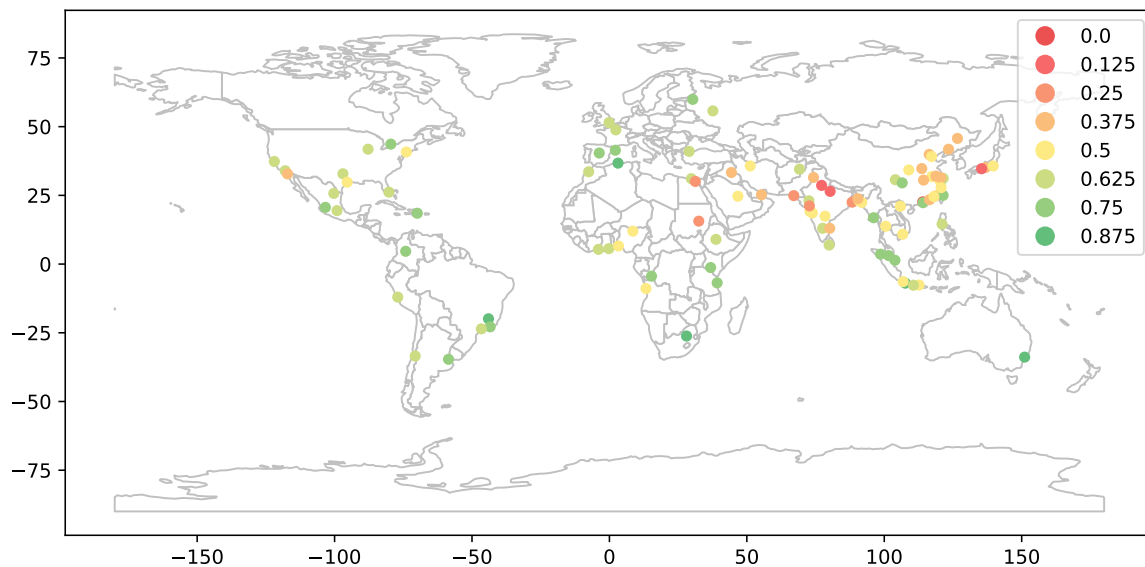


Figura 5.7: Mapa de los centros urbanos de acuerdo al índice de sustentabilidad.

Tabla 5.5: Índice de sustentabilidad para los 100 centros urbanos con sus respectivos puntajes.

Ciudad	Punt.	Ciudad	Punt.	Ciudad	Punt.
Bandung	0.875	Chengdu	0.625	Chittagong	0.5
Johannesburgo	0.875	Lima	0.625	Xi'an	0.5
Belo Horizonte	0.875	Chicago	0.625	Houston	0.5
Argel	0.875	Ahmedabad	0.625	Wenzhou	0.5
Sídney	0.875	Santiago	0.625	Kano	0.5
Buenos Aires	0.75	Alejandría	0.625	Xiamen	0.5
Rio de Janeiro	0.75	Miami	0.625	Hefei	0.5
Taipéi	0.75	Dallas	0.625	Daca	0.375
Bogota	0.75	Yogyakarta	0.625	Pekín	0.375
Singapur	0.75	San Jose	0.625	Jieyang	0.375
Kuala Lumpur	0.75	Abiyán	0.625	Lahore	0.375
Toronto	0.75	Acra	0.625	Chennai	0.375
Hong Kong	0.75	Kabul	0.625	Suzhou	0.375
Rangún	0.75	Colombo	0.625	Nagoya	0.375
Kinshasa	0.75	Monterrey	0.625	Wuhan	0.375
Dar es Salaam	0.75	Casablanca	0.625	Shenyang	0.375
Madrid	0.75	Adís Abeba	0.625	Nankín	0.375
Chongqing	0.75	Yakarta	0.5	Baghdad	0.375
Guadalajara	0.75	Tokio	0.5	Dubai	0.375
San Petesburgo	0.75	Mumbai	0.5	Tijuana	0.375
Nairobi	0.75	Nueva York	0.5	Zhengzhou	0.375
Medan	0.75	Bangkok	0.5	Harbin	0.375
Santo Domingo	0.75	Teherán	0.5	Quanzhou	0.375
Barcelona	0.75	Lagos	0.5	Calcuta	0.25
Shanghái	0.625	Ho Chi Minh	0.5	El Cairo	0.25
C. Quezon	0.625	Surabaya	0.5	Karachi	0.25
C. de México	0.625	Hyderabad	0.5	Jartum	0.25
São Paulo	0.625	Hangzhou	0.5	Surat	0.25
Los Angeles	0.625	Luanda	0.5	Nueva Delhi	0.125
Estambul	0.625	Pune	0.5	Osaka	0.125
Moscú	0.625	Tianjin	0.5	Kanpur	0.125
Bangalore	0.625	Comilla	0.5	Guangzhou	0
París	0.625	Riyadh	0.5		
Londres	0.625	Hanói	0.5		

5.4. Cambio climático

Nuevo análisis jerárquico aglomerativo

Se realizaron dos nuevos agrupamientos de los centros urbanos con el fin de analizarlos desde el índice de sustentabilidad y su futuro grado de exposición al cambio climático. El primer agrupamiento se realizó utilizando el índice de sustentabilidad y las proyecciones para el año 2100 de los cambios en la precipitación y temperatura del escenario RCP2.6. El segundo agrupamiento contempla el índice de sustentabilidad así como las proyecciones para 2100 del escenario RCP8.5 para la precipitación y la temperatura.

Para ambos agrupamientos se utilizaron distancias euclidianas así como el método de agrupamiento de Ward, con el cual se obtuvo una mejor interpretación de los datos. Los dendogramas obtenidos en cada agrupamiento se presentan en la figura 5.9. En ambos casos, a una distancia de enlace de 10 se observan dos grandes grupos que contienen cerca de la mitad de las ciudades, mientras que a una distancia menor se observa una mayor cantidad de grupos con menos ciudades en cada uno. Se eligió una distancia de enlace de 2 para el dendograma con el escenario RCP2.6 y una distancia de 2.5 para el dendograma con el RCP8.5. De esta manera ambos análisis presentaron 5 grupos que permitieron obtener en mejor detalle las características de cada grupo, así como una semejanza en el agrupamiento de ambos escenarios.

De acuerdo con el índice de sustentabilidad y las proyecciones de precipitación y temperatura, las características de cada grupo se pueden resumir en la tabla 5.6 y tabla 5.7 donde se muestra el promedio de los tres valores de cada grupo para el RCP2.6 y RCP8.5.

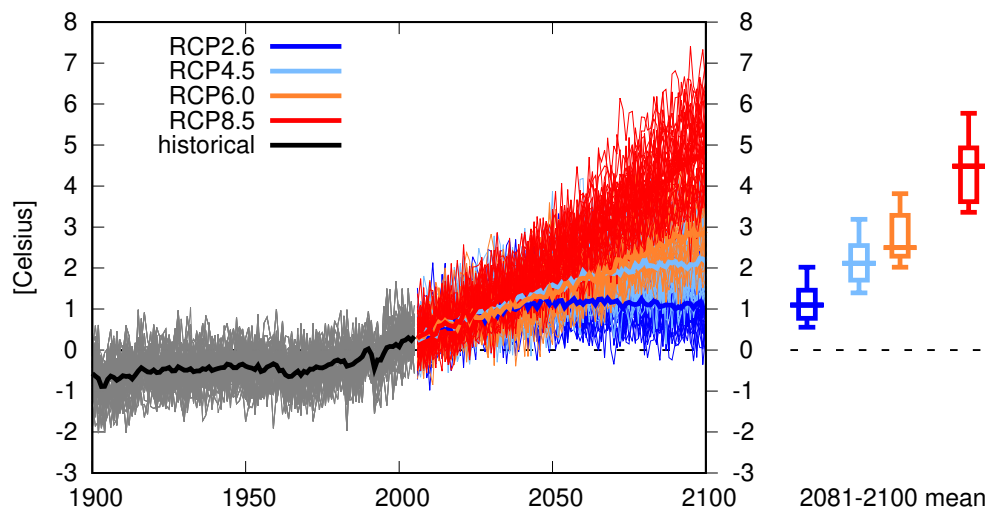


Figura 5.8: Ejemplo de las diferentes RCP para el aumento de la temperatura del centro urbano etiquetado como Ciudad de México. Imagen recuperada de [111].

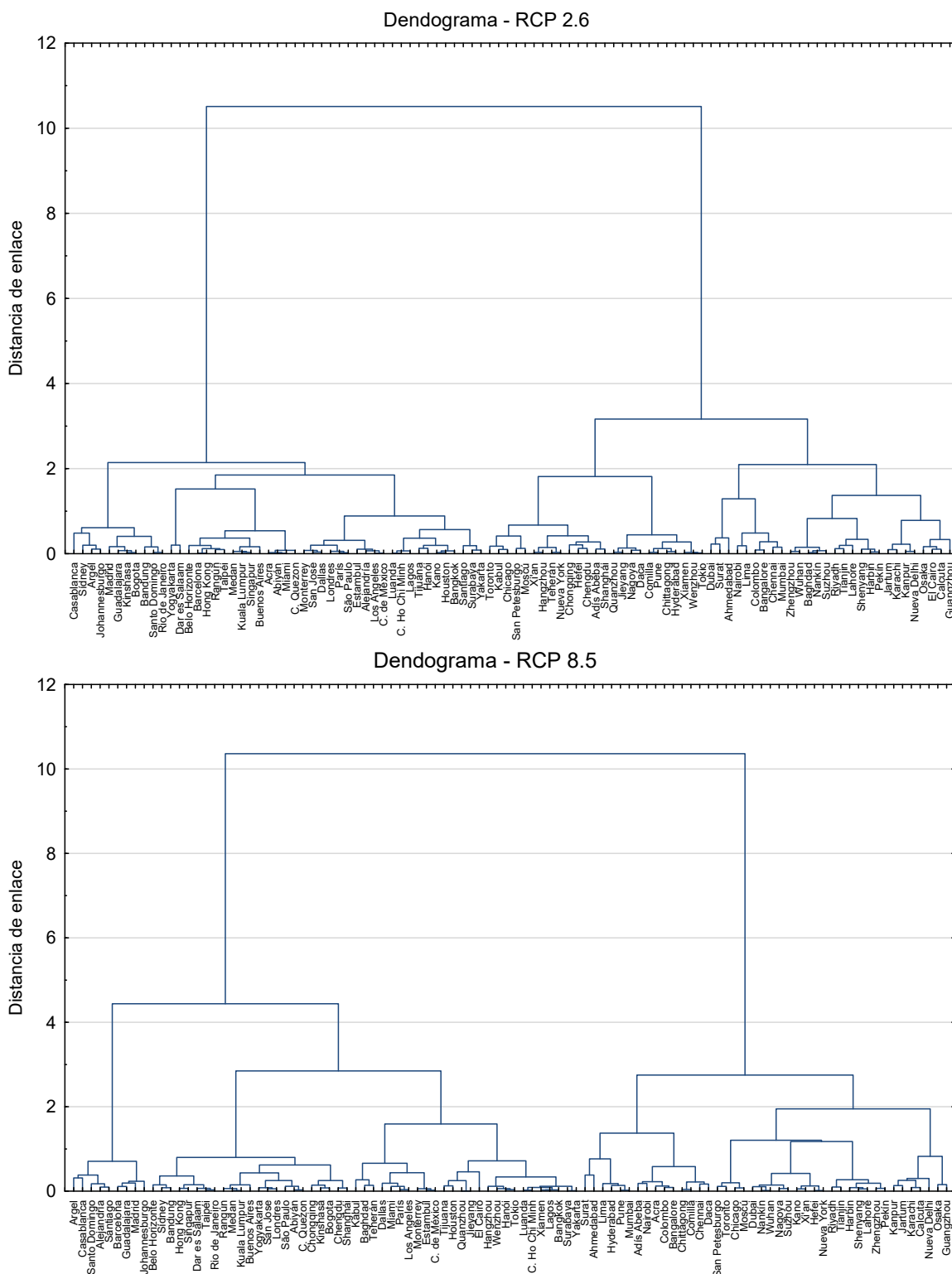


Figura 5.9: Dendrograma del agrupamiento del índice de sustentabilidad con las proyecciones de cambio climático de precipitación y temperatura para la RCP2.6 (arriba) y RCP8.5 (abajo).

Escenario RCP2.6

En el caso del escenario RCP2.6 es relevante destacar que el grupo 1 está caracterizado por los valores del índice de sustentabilidad más altos. De acuerdo con las proyecciones se espera que la temperatura aumente alrededor de un grado y que haya pocos cambios en las precipitaciones (aproximadamente 2%), algunas de las ciudades que lo conforman son Sídney, Madrid, Guadalajara, Río de Janeiro y Bogotá. Por otro lado, el grupo 2 es el que presentaría el mayor aumento en precipitaciones con casi 10% y, junto con el grupo 5, uno de los aumentos de temperaturas más bajos. Las ciudades de Lima, Nairobi, Dubai, Chennai y Bangalore se encuentran en este grupo. Las ciudades del grupo 3, como Bagdad, Lahore, Wuhan, Nueva Delhi, Osaka y Guangzhou son las que presentan los niveles más bajos en el índice de sustentabilidad y el mayor aumento en la temperatura promedio con 1.24°C, además de que es el segundo grupo con mayor aumento en precipitaciones. Para el caso del grupo 4, este es el segundo con el mayor aumento en temperatura y el tercero en precipitaciones, se caracteriza por un índice de sustentabilidad medio; algunas ciudades de este grupo son Nueva York, San Petesburgo, Toronto, Tokio, Nagoya y Daca. Finalmente, el último grupo es el más numeroso, presentaría bajo el escenario RCP2.6 uno de los aumentos de las temperaturas y de las precipitaciones más bajos, además de que es el segundo grupo con un índice de sustentabilidad más alto, en este grupo se encuentran ciudades como Belo Horizonte, Ciudad de México, París, Lagos, Londres y Monterrey.

En este escenario existe una ligera relación entre el índice de sustentabilidad de cada grupo y la futura exposición de los centros urbanos al cambio climático. Por un lado, los grupos con un índice de sustentabilidad relativamente alto (grupo 1 y grupo 5) son los que tendrán los menores cambios en precipitación y de los aumentos en la temperatura más bajos. Por otro lado, el grupo 3 que cuenta con el índice más bajo es el que tendrá el mayor aumento en temperatura y uno de los mayores aumentos en la precipitación. En el caso de los grupos 2 y 4 que tienen índices medios, la tendencia no es clara.

Tabla 5.6: Promedios del índice de sustentabilidad, aumento de la temperatura y cambio relativo en la precipitación para el año 2100 de los grupos en el escenario RCP2.6.

Grupo	# de ciudades	Índice S. Promedio	Temperatura promedio	Precipitación promedio
1	11	0.78	1.02 °C	2.22 %
2	9	0.55	0.96 °C	9.27 %
3	19	0.30	1.24 °C	7.13 %
4	25	0.54	1.22 °C	4.36 %
5	36	0.62	0.96 °C	1.6 %

Escenario RCP8.5

Bajo el escenario RCP8.5, el grupo 1 es el que tiene un mayor índice de sustentabilidad, sin embargo es el que presentaría un mayor cambio en las precipitaciones así como uno de los más grandes aumentos en la temperatura. Está conformado por ciudades como Argel, Casablanca, Johannesburgo, Barcelona y Santiago de Chile. El grupo 2 es el que tendría el menor aumento en precipitaciones y temperatura, además de que cuenta con un alto índice en sustentabilidad, algunas ciudades que lo conforman son São Paulo, San José, Singapur, Sídney y Bogotá. A pesar de que las ciudades del grupo 3 tienen un índice de sustentabilidad medio, estas son las que tendrán un mayor aumento en la precipitación promedio con casi el 30 %, algunas de las ciudades en este grupo son Nairobi, Surat, Comilla, Mumbai y Chittagong. Las ciudades del grupo 4 como Tokio, Ciudad de México, El Cairo, Luanda, Los Angeles y Monterrey son las que tendrán el menor cambio en la precipitación promedio y uno de los aumentos en la temperatura más bajos, además de que tienen en promedio valores bajos en el índice de sustentabilidad. Finalmente, el grupo 5 es el que mayor aumento de temperatura tendría y es el segundo con mayor aumento en precipitaciones, este es el grupo con el índice de sustentabilidad más bajo. Algunas de las ciudades que lo conforman son Hefei, San Petesburgo, Nagoya, Chicago y Nankín.

Para este escenario, existen grupos donde las ciudades que lo componen a pesar de tener valores altos en el índice de sustentabilidad, tendrán una mayor exposición al cambio climático, como el caso del grupo 1. Por otro lado, hay grupos cuyas ciudades tienen actualmente valores bajos en sustentabilidad y que también tendrán una alta exposición al calentamiento global, como es el caso de los grupos 3, 4 y 5. Estos grupos tienen un doble desafío al intentar volverse ciudades más sustentables y reducir, mitigar o adaptarse a los futuros riesgos que el cambio climático traiga consigo.

Es importante recalcar que los valores de cada grupo son promedios, por lo que en algunas ocasiones se pueden tener grupos donde uno de los tres valores esté muy disperso.

Tabla 5.7: Promedios del índice de sustentabilidad, aumento de la temperatura y cambio relativo en la precipitación para el año 2100 de los grupos en el escenario RCP8.5.

Grupo	# de ciudades	Índice S. Promedio	Temperatura promedio	Precipitación promedio
1	9	0.73	4.14 °C	22.8 %
2	23	0.72	3.65 °C	4.73 %
3	15	0.53	3.79 °C	27.62 %
4	26	0.51	4.11 °C	4.99 %
5	27	0.39	4.84 °C	15.81 %

Ubicación geográfica de los grupos

Se utilizaron dos mapas para ubicar geográficamente a los grupos en ambos escenarios (RCP2.6 y RCP8.5), con el fin de estudiar la relación que existe entre los grupos y la evolución del agrupamiento en ambos escenarios (figura 5.10).

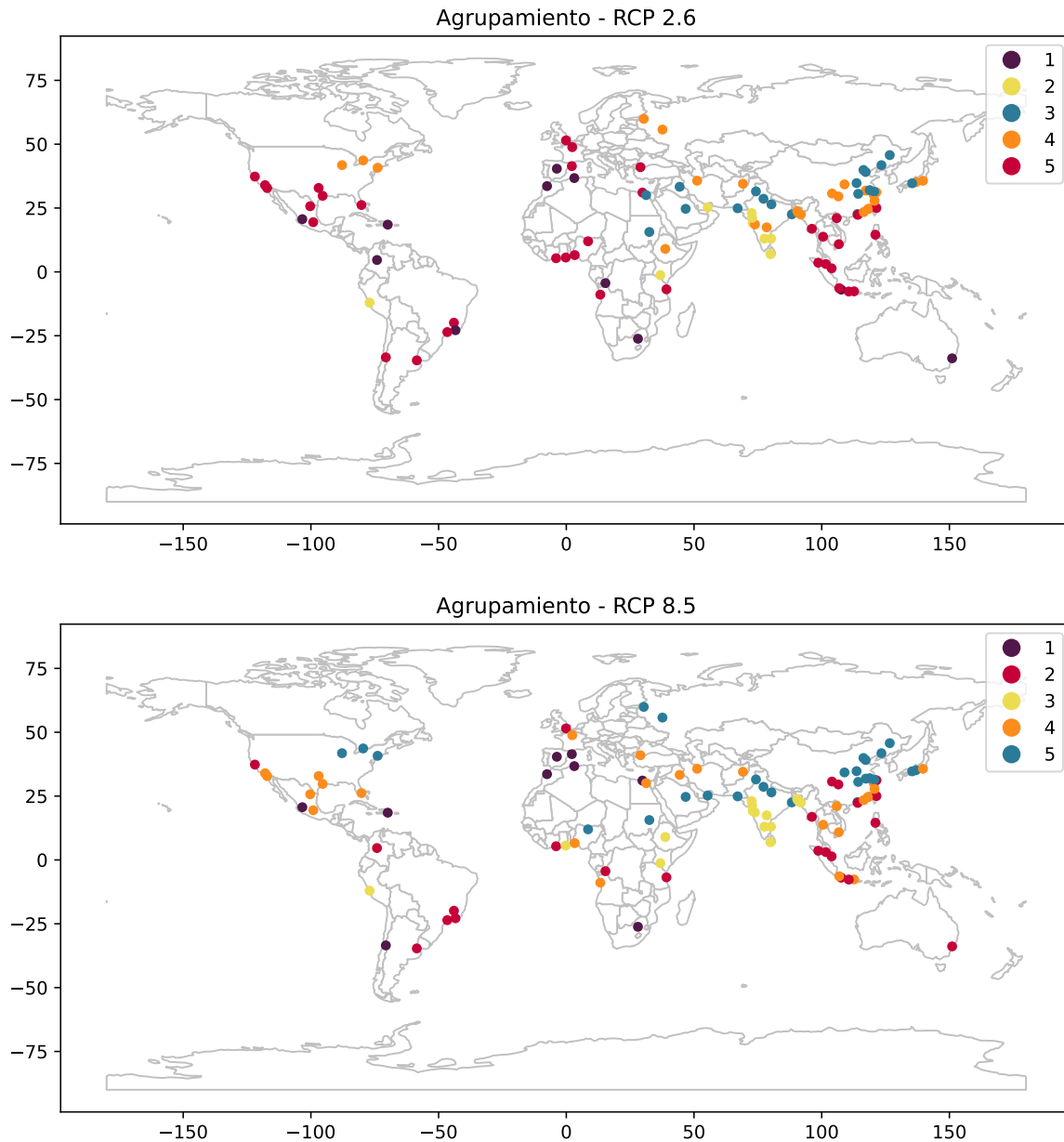


Figura 5.10: Ubicación geográfica de los grupos para la RCP2.6 (arriba) y la RCP8.5 (abajo).

De acuerdo con estos resultados se puede apreciar que muchas ciudades se mantienen agrupadas en ambos escenarios, además de que la tendencia en la ubicación geográfica de ambos grupos se conserva. Por ejemplo, los países de China, India y Estados Unidos en general tienen la misma distribución de los grupos para los dos escenarios. Sin embargo, también hay cambios apreciables en ciudades que dejan de estar agrupadas, como en las ciudades del este de Sudamérica y del oeste de África.

Bajo el escenario RCP2.6, los grupos 3 y 4 son los que presentarán el mayor aumento de temperatura promedio y se ubican principalmente en la zona del este y sur de Asia. Los grupos con un mayor cambio porcentual en la precipitación son el grupo 2 y el grupo 3 que se ubican en la India y el este de China. Esta zona del mundo, de acuerdo con la figura 5.7, es la que tiene las puntuaciones más bajas en el índice de sustentabilidad. Por lo que esta es la zona que también tendrá la mayor exposición al cambio climático bajo este escenario. Por otro lado, el grupo 5 presenta las menores afectaciones al cambio climático, de acuerdo con la figura 5.10, este grupo se encuentra distribuido en las regiones de América, Europa, el suroeste de África, el sureste Asiático y Oceanía. En este grupo se tienen puntajes medios y altos en el índice de sustentabilidad (de 0.5 a 0.875) a excepción de Tijuana con un puntaje de 0.375.

Para el caso del escenario RCP8.5, los grupos 1 y 5 son los que presentan el mayor cambio tanto en temperatura como en precipitaciones. De acuerdo con la figura 5.10 estos se encuentran principalmente en las regiones de Europa y Estados Unidos, África Central, el norte de India y el este de China. Haciendo una comparación con la figura 5.7, la relación entre el índice de sustentabilidad con las futuras afectaciones del cambio climático deja de ser clara para este escenario, puesto que los centros de Europa y Estados Unidos tienen puntajes altos en el índice mientras que las ciudades asiáticas cuentan con puntajes medios y bajos. Los grupos 2 y 4 presentaron los cambios más bajos en temperatura y precipitación, estos se encuentran más dispersos a lo largo del mundo, con ciudades principalmente en Estados Unidos, México y partes del sur de Asia. Bajo este escenario, la región del norte de India y el este de China se mantiene como la de menor sustentabilidad y mayor exposición al cambio climático. Sin embargo, la parte de Europa se anexa como una de las regiones más expuestas a los cambios futuros en el clima.

Índice compuesto de cambio climático

Con el fin de obtener una medida cuantitativa conjunta de los cambios de la precipitación y temperatura, se creó un índice compuesto englobando ambas variables. Se utilizó la medida de distancia euclidiana estandarizada para n dimensiones, definida como

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(p_i - q_i)^2}{s_i}}$$

Donde $p_i - q_i$ es el cambio entre los valores actuales de una variable climática i y su proyección a futuro, y s_i es la desviación estándar del conjunto de datos de la variable i [125]. Se utilizó esta medida de distancia ya que las distancias euclidianas representan una medida de discrepancia entre las condiciones climáticas actuales y futuras de una ciudad [37], mientras que la estandarización hace las variables de precipitación y temperatura tengan una varianza de 1, haciendo que las contribuciones de ambas tengan el mismo peso [126].

De esta manera, se obtuvo el índice compuesto del grado de exposición al cambio climático para cada centro urbano en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, que se muestran en la tabla 5.8 y la tabla 5.9. Además, la figura 5.11 muestra los mapas de la clasificación de los centros urbanos bajo este índice compuesto.

Bajo el escenario RCP2.6, mostrado en la parte de arriba de la figura 5.11 y en la tabla 5.8, las ciudades que presentarían los mayores cambios en el clima son las localizadas en el sur de Asia. En particular, los centros urbanos de Ahmedabad (India), Dubai (India), Surat (India), Lahore (Pakistán) y Riyadh (Arabia Saudita) con valores mayores a 6. Mientras que los valores para el resto del mundo en su mayor parte tienen valores menores a 4.

Sin embargo, bajo el escenario RCP8.5, mostrado en la parte inferior de la figura 5.11 y en la tabla 5.9, la mitad de los centros urbanos presentarían un valor mayor o igual a 6 en el índice compuesto. Como casos particulares se tienen a los centros de Ahmedabad con un puntaje de 14.4, Surat con 13.72 y Casablanca (Marruecos) con 10.67, por lo que estos son los centros con los mayores cambios en conjunto de la precipitación y temperatura. Cabe mencionar que bajo este escenario, muchas ciudades de Europa y Norteamérica como Moscú, Nueva York, Los Ángeles y Chicago se encuentran en la mitad superior del índice compuesto, y se verán más expuestas al cambio climático que en el escenario RCP2.6.

Tomando en cuenta el índice de sustentabilidad de la tabla 5.8 y la tabla 5.9 obtenido del análisis por componentes principales, se puede notar que muchos centros urbanos a pesar de tener altos valores en sustentabilidad, podrían sufrir grandes afectaciones en ambos escenarios y viceversa.

En el caso del RCP2.6 las ciudades de Ahmedabad, Lima y Nairobi se encuentran entre las diez ciudades más expuestas al cambio climático a pesar de que presentaron valores en el índice de sustentabilidad de 0.625 o más. Las 51 ciudades con un valor

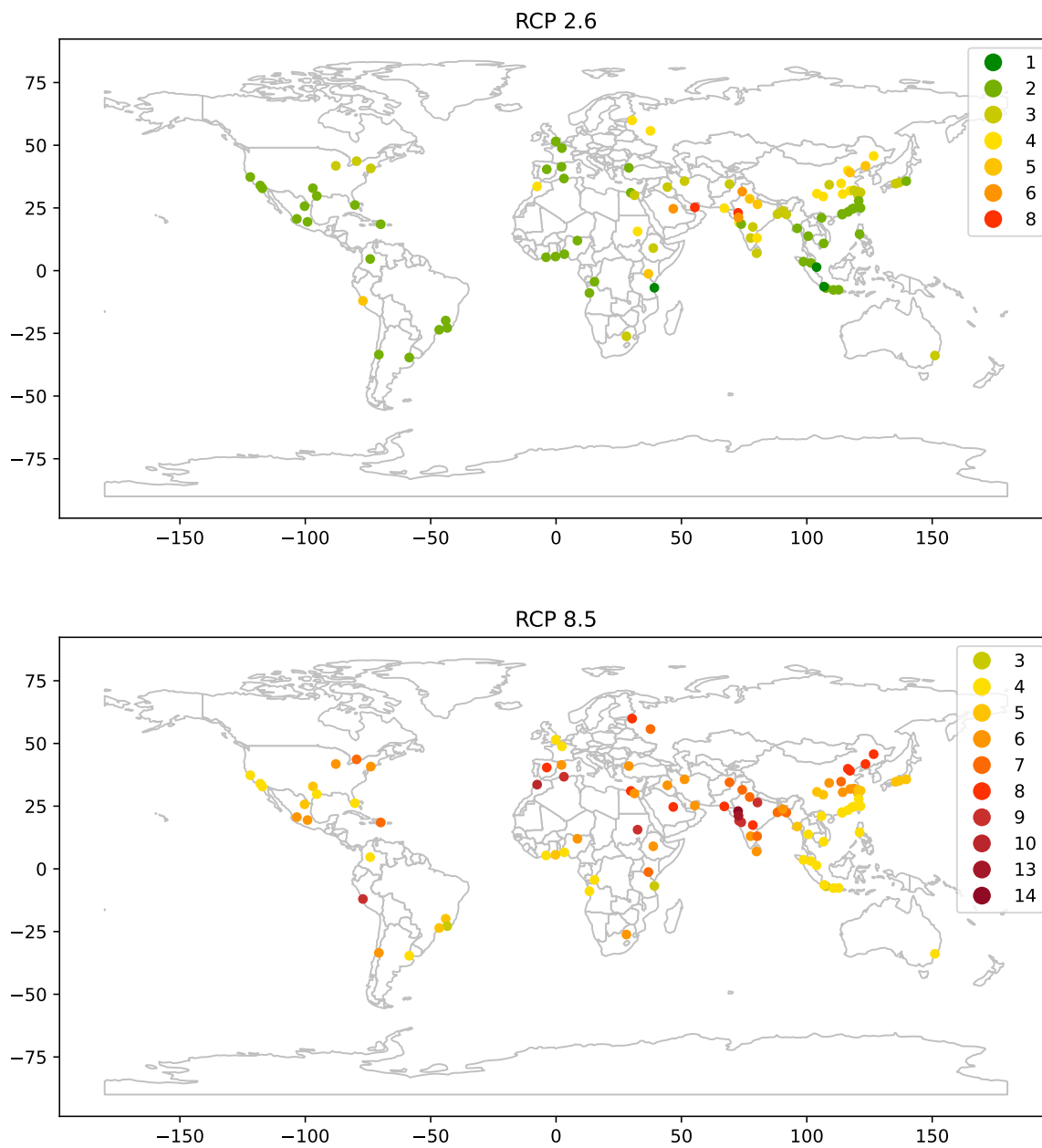


Figura 5.11: Índice compuesto de cambio climático para cada centro urbano para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

menor a 3 en el índice compuesto obtuvieron puntajes mayores a 0.5 en el índice de sustentabilidad, a excepción de Guangzhou con un puntaje de 0.

Para el caso del escenario RCP8.5 en la tabla 5.9, se tiene que los 100 centros urbanos presentan una distancia entre 3.78 y 14.4. Bajo este escenario se tienen ciudades como Kanpur, Nagoya y Nankín con bajos valores en la sustentabilidad y menores cambios en el clima. Por otro lado, las ciudades de Bogotá, Estambul, Bangalore y Chengdu tienen altos valores en sustentabilidad y tendrían grandes cambios climáticos bajo este escenario. La capacidad de adaptación frente a los futuros riesgos que traiga consigo el calentamiento global no está definida por la situación actual de los centros urbanos.

Casos particulares

Finalmente, se desglosa la comparación entre el índice de sustentabilidad y las proyecciones de la temperatura y la precipitación para cada centro urbano bajo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 que se muestran en la tabla C.2 y en la tabla C.3 del apéndice C.

En el caso del escenario RCP2.6, el aumento de temperatura para los 100 centros urbanos varía entre 0.72°C y 1.63°C , mientras que el cambio relativo de la precipitación se encuentra dentro de los valores de -7.45% y 16.25% . Johannesburgo es uno de los centros urbanos con la calificación más alta en sustentabilidad, sin embargo en el escenario RCP2.6 es una de las ciudades con mayor aumento de la temperatura. Moscú y Ahmedabad tienen un puntaje de 0.625 en el índice, el primero es el que reportaría un mayor aumento en la temperatura con 1.63°C , mientras que el segundo tendría el mayor cambio porcentual en la precipitación con 16.25% . Por otro lado Calcuta, Karachi y Surat tienen un puntaje de 0.25 en el índice y el aumento de su temperatura será de menos de un grado.

Para el escenario RCP8.5 se proyecta que para finales de siglo la temperatura de los 100 centros urbanos aumente en un rango de 2.95°C a 5.77°C , mientras que los cambios de precipitación se encuentran dentro de -37.89% a 52.13% . Bajo este escenario se tienen centros urbanos que a pesar de tener un índice alto en sustentabilidad tendrán una fuerte exposición al cambio climático tales como Guadalajara, Hong Kong y Medan que tienen un puntaje de 0.75 y cuya temperatura aumentaría más de 5°C ; o París, Acra y Kabul que tienen un puntaje de 0.625 y tendrían cambios porcentuales mayores al 30% en sus precipitaciones. Cabe destacar que Guangzhou tiene un puntaje de 0 y su temperatura aumentará 3.75°C y la variación en precipitaciones será menor al 1%.

En el caso de la Ciudad de México que presentó un puntaje de 0.625, bajo el escenario RCP2.6 tendrá un aumento de la temperatura de poco más de un grado y pocos cambios en la precipitación. Sin embargo, en el escenario RCP8.5 esta ciudad presentaría un aumento de más de 5°C en la temperatura y un cambio en la precipitación de más del 15%.

De acuerdo a este análisis, bajo ambos escenarios todas las ciudades tienen una alta exposición al cambio climático.

Tabla 5.8: Índice compuesto de cambio climático para el escenario RCP2.6 (2.6) e índice de sustentabilidad (S) para los 100 centros urbanos.

Ciudad	2.6	S	Ciudad	2.6	S	Ciudad	2.6	S
Dar es Salaam	1.80	0.75	Los Angeles	2.52	0.625	Xi'an	3.65	0.5
Yakarta	1.89	0.5	Hanoi	2.57	0.5	Chicago	3.80	0.625
Singapur	1.94	0.75	Barcelona	2.67	0.75	Baghdad	3.85	0.375
C. Ho Chi M.	2.03	0.5	Jieyang	2.69	0.375	Colombo	3.91	0.625
Bandung	2.03	0.875	San Jose	2.70	0.625	Nankín	3.92	0.375
Sto. Domingo	2.04	0.75	Argel	2.73	0.875	Bangalore	3.93	0.625
Surabaya	2.04	0.5	Hong Kong	2.74	0.75	Toronto	3.98	0.75
Rio de Janeiro	2.07	0.75	Estambul	2.74	0.625	Chennai	4.06	0.375
Luanda	2.08	0.5	Rangún	2.76	0.75	Zhengzhou	4.17	0.375
Kuala Lumpur	2.08	0.75	Quanzhou	2.83	0.375	Mumbai	4.19	0.5
Medan	2.13	0.75	Guangzhou	2.84	0	Chengdu	4.22	0.625
Yogyakarta	2.14	0.625	Madrid	2.84	0.75	Hefei	4.22	0.5
C. Quezon	2.17	0.625	Pune	2.85	0.5	Casablanca	4.27	0.625
Lagos	2.22	0.5	Dallas	2.86	0.625	Chongqing	4.29	0.75
Miami	2.23	0.625	Xiamen	2.87	0.5	Wuhan	4.48	0.375
Acra	2.23	0.625	Tokio	2.89	0.5	Jartum	4.80	0.25
Bangkok	2.24	0.5	Wenzhou	2.97	0.5	Harbin	4.81	0.375
Abiyán	2.25	0.625	Comilla	3.04	0.5	Karachi	4.84	0.25
Londres	2.30	0.625	Sidney	3.08	0.875	San Petesb.	4.91	0.75
Alejandría	2.31	0.625	Daca	3.08	0.375	Pekín	4.93	0.375
Guadalajara	2.33	0.75	Adís Abeba	3.14	0.625	Moscú	4.95	0.625
Taipéi	2.34	0.75	Johannesburgo	3.15	0.875	Kanpur	5.15	0.125
Buenos Aires	2.37	0.75	Nagoya	3.22	0.375	Nairobi	5.18	0.75
São Paulo	2.38	0.625	Osaka	3.23	0.125	N. Delhi	5.32	0.125
Santiago	2.39	0.625	Chittagong	3.34	0.5	Tianjin	5.40	0.5
Kinshasa	2.39	0.75	Teherán	3.39	0.5	Shenyang	5.45	0.375
Houston	2.40	0.5	Kabul	3.40	0.625	Lima	5.96	0.625
Bogota	2.42	0.75	Shanghái	3.40	0.625	Riyadh	6.12	0.5
Belo Horizonte	2.45	0.875	Calcuta	3.46	0.25	Lahore	6.45	0.375
París	2.46	0.625	Hangzhou	3.51	0.5	Surat	6.93	0.25
Tijuana	2.48	0.375	Nueva York	3.51	0.5	Dubai	8.33	0.375
Kano	2.49	0.5	El Cairo	3.52	0.25	Ahmedabad	8.38	0.625
C. de México	2.49	0.625	Suzhou	3.55	0.375			
Monterrey	2.50	0.625	Hyderabad	3.58	0.5			

Tabla 5.9: Índice compuesto de cambio climático para el escenario RCP8.5 (8.5) e índice de sustentabilidad (S) para los 100 centros urbanos.

Ciudad	8.5	S	Ciudad	8.5	S	Ciudad	8.5	S
Nagoya	3.78	0.375	Quanzhou	5.01	0.375	Londres	6.98	0.625
París	3.90	0.625	Buenos Aires	5.02	0.75	Abiyán	7.06	0.625
Santiago	3.98	0.625	C. de México	5.08	0.625	Chicago	7.16	0.625
Riyadh	4.00	0.5	Baghdad	5.09	0.375	Ahmedabad	7.19	0.625
Mumbai	4.05	0.5	Dar es Salaam	5.35	0.75	Hyderabad	7.21	0.5
Rio de Janeiro	4.07	0.75	Sídney	5.42	0.875	Teherán	7.23	0.5
Kanpur	4.09	0.125	Lahore	5.51	0.375	Tianjin	7.36	0.5
Colombo	4.14	0.625	Zhengzhou	5.53	0.375	Yakarta	7.40	0.5
C. Ho Chi M.	4.20	0.5	Shenyang	5.61	0.375	N. Delhi	7.44	0.125
Hong Kong	4.30	0.75	Bandung	5.65	0.875	Argel	7.49	0.875
Guadalajara	4.37	0.75	Madrid	5.66	0.75	Los Angeles	7.61	0.625
Nankín	4.42	0.375	Sto. Domingo	5.77	0.75	Xiamen	7.65	0.5
Nairobi	4.43	0.75	Barcelona	5.93	0.75	Nueva York	7.94	0.5
El Cairo	4.45	0.25	Hanói	5.96	0.5	Singapur	8.06	0.75
Surat	4.46	0.25	Toronto	6.02	0.75	Pekín	8.10	0.375
Adís Abeba	4.48	0.625	Taipéi	6.09	0.75	Comilla	8.13	0.5
Dallas	4.48	0.625	Casablanca	6.13	0.625	Hangzhou	8.18	0.5
Chongqing	4.51	0.75	C. Quezon	6.19	0.625	Chittagong	8.21	0.5
Xi'an	4.53	0.5	Guangzhou	6.19	0	Suzhou	8.32	0.375
Surabaya	4.54	0.5	Tijuana	6.22	0.375	San Jose	8.46	0.625
Jartum	4.56	0.25	Hefei	6.27	0.5	Yogyakarta	8.59	0.625
Acra	4.60	0.625	Johannesburgo	6.32	0.875	Moscú	8.72	0.625
Alejandro	4.70	0.625	Bangkok	6.39	0.5	Shanghái	8.81	0.625
Monterrey	4.70	0.625	Harbin	6.49	0.375	Chengdu	9.19	0.625
Wenzhou	4.70	0.5	San Petesb.	6.53	0.75	Bangalore	9.20	0.625
Kano	4.71	0.5	Osaka	6.56	0.125	Estambul	9.46	0.625
Belo Horizonte	4.73	0.875	Karachi	6.59	0.25	Calcuta	9.66	0.25
Miami	4.78	0.625	Kabul	6.61	0.625	Luanda	9.71	0.5
Lagos	4.88	0.5	Jieyang	6.63	0.375	Bogota	9.92	0.75
Houston	4.92	0.5	Pune	6.64	0.5	Wuhan	10.6	0.375
Kinshasa	4.92	0.75	São Paulo	6.79	0.625	Tokio	13.7	0.5
Lima	4.94	0.625	Kuala Lumpur	6.79	0.75	Chennai	14.4	0.375
Medan	4.96	0.75	Daca	6.93	0.375			
Rangún	4.99	0.75	Dubai	6.97	0.375			

6 Conclusiones

Se realizó el análisis estadístico de 100 de los centros urbanos más poblados en el mundo para el año 2015 con el fin de evaluar su situación actual con respecto a su sustentabilidad y los posibles escenarios climáticos que afrontarán debido al calentamiento global. Se utilizaron 32 indicadores de la base de datos UCDB del Centro Común de Investigación de la Unión Europea en 5 diferentes dimensiones: geográfica, socio-económica, ambiental, riesgo de desastres y de sustentabilidad.

Utilizando el análisis por componentes principales se obtuvieron nueve componentes que lograron explicar el 82.3% de la varianza del conjunto de datos original y que pudieron ser interpretadas como indicadores del grado de urbanización, emisión de contaminantes, exposición inundaciones, espacios verdes, desarrollo socio-económico, exposición a marejadas ciclónicas, exposición a sismos, acceso a servicios, exposición a olas de calor y expansión de la mancha urbana.

Utilizando las nuevas componentes se agruparon a los centros urbanos en 6 conjuntos utilizando un agrupamiento jerárquico aglomerativo. Los grupos resultantes presentaron una estrecha relación con la ubicación geográfica de las ciudades y al analizar las variables originales, se evidenció la relación entre el agrupamiento y las nueve componentes principales.

Además, fue posible crear un índice de sustentabilidad, calificando a cada centro dependiendo si los valores para cada componente principal contribuían de manera positiva a su sustentabilidad. En este caso, se encontró un patrón geográfico donde los centros urbanos ubicados en el sur de Asia presentaron los puntajes más bajos en el índice mientras que las regiones de Europa, América y partes de África obtuvieron puntajes medios y altos.

En la cuestión climática, se utilizaron las proyecciones del aumento de la temperatura y cambios en la precipitación de los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 a finales de siglo para realizar un nuevo agrupamiento de las ciudades con estas proyecciones y el índice de sustentabilidad. Se encontró que muchas ciudades se mantienen agrupadas en ambos escenarios, además de que la tendencia en la ubicación geográfica de ambos grupos se conserva. Por ejemplo, los países de China, India y Estados Unidos en general tienen la misma distribución de los grupos para los dos escenarios. No obstante, hay cambios apreciables en ciudades que dejan de estar agrupadas como en las ciudades del este de Sudamérica y del oeste de África.

Finalmente, se utilizó la distancia euclidiana estandarizada para obtener un nuevo índice que indicara el cambio conjunto de la temperatura como de la precipitación. Es importante recalcar que los valores del aumento de la temperatura no toman en cuenta

el fenómeno de la ICU, por lo que los resultados encontrados podrían desestimar la situación futura que las ciudades puedan enfrentar.

Para el escenario RCP2.6 se encontró una ligera asociación geográfica entre los puntajes bajos del índice de sustentabilidad y los mayores cambios en la temperatura y precipitación; y entre los puntajes medios y altos del índice de sustentabilidad y los cambios más bajos en las variables climáticas. Por lo que bajo un escenario de mitigación estricta, acorde con las políticas públicas actuales y donde se ha construido una estructura de adaptación y mitigación al cambio climático, los centros urbanos ubicados en el sur de Asia son los que tendrían una mayor exposición al cambio climático.

Por otro lado, en el escenario RCP8.5 se encontró que Europa y el sur de Asia son las regiones que tendrán un mayor riesgo frente al cambio climático, además de que existen centros urbanos que tienen valores bajos en sustentabilidad en la actualidad y que en el futuro tendrán una alta exposición al calentamiento global. Por lo que en un escenario sin mitigación de las emisiones de GEI e incompatible con el Acuerdo de París, existen centros urbanos que enfrentarán un doble desafío: el implementar políticas y realizar acciones que hagan de estas ciudades más sustentables y mitigar y adaptarse a los futuros riesgos que el cambio climático traiga consigo. Cabe mencionar que el RCP8.5 es el escenario más extremo sobre el futuro del sistema clima, y en donde se tendrán escenarios de riesgo nunca antes vistos. Por lo que se hace hincapié en la relevancia de las acciones que los centros urbanos tomen hoy en día para mejorar su sustentabilidad y mitigar los efectos del cambio climático.

Es importante tener en cuenta, como se mencionó en la introducción, que la sustentabilidad es un fenómeno multidimensional muy complejo, que debe de ser analizado desde los aspectos políticos, sociales, económicos, culturales, geográficos y ambientales; por lo que este trabajo puede ser analizado desde más indicadores y perspectivas que tomen en cuenta no solo cantidad sino también calidad. Además este concepto se encuentra en constante evolución y debe de adaptarse en el tiempo dependiendo del contexto. Algunos posibles indicadores a incluir en futuros trabajos son indicadores de equidad, inclusividad, de género, medidas del desempeño ecológico y social, de participación social, calidad de espacios verdes y externalidades.

Este es un trabajo a escala global, donde se analiza la sustentabilidad de los 100 centros urbanos más grandes del mundo. Sin embargo, se debe cuestionar a qué escala se busca la sustentabilidad. Los centros urbanos no son fenómenos aislados, y factores como los asentamientos periurbanos y rurales, fenómenos climáticos a mayor escala o fenómenos como la globalización, juegan un enorme papel en el estado ambiental, social y económico de las ciudades. Por tanto este trabajo puede expandirse al incluir información en una escala más regional para considerar los aspectos ya mencionados y también al implementar medidas y referencias a escala local, adaptadas a los criterios que cada centro urbano considere que es lo más importante para su propia calidad de vida, de manera que se tenga un análisis más completo de la sustentabilidad.

A Lista de los 100 centros urbanos

Etiqueta	País	Lista de nombres
Abiyán	Costa de Marfil	Abiyán, Abobo, Yopougon, Cocody, Koumassi, Port-Bouët, Adjamé, Marcory, Attécoubé, Anyama Plateau, Treichville.
Acra	Ghana	Acra, Ashaiman, Tema.
Adís Ababa	Etiopía	Adís Ababa.
Ahmedabad	India	Ahmedabad.
Alejandro	Egipto	Alejandro.
Argel	Algeria	Argel, Les Eucalyptus, Kouba.
Baghdad	Irak	Baghdad.
Bandung	Indonesia	Bandung, Cimahi.
Bangalore	India	Bangalore.
Bangkok	Tailandia	Bangkok, Nonthaburi, City of Nonthaburi, Pak Kret, Bangkok Noi, Taling Chan, Bang Phlat, Bang Kho Laem; Thawi Watthana, Rangsit, Samut Prakan, Mueang Nonthaburi, Samut Sakhon, Bang Kruai.
Barcelona	España	Barcelona, l'Hospitalet de Llobregat, Badalona, Terrassa, Sabadell.
Belo Horizonte	Brasil	Belo Horizonte, Contagem, Betim, Ibirité.
Bogota	Colombia	Bogota, Soacha.
Buenos Aires	Argentina	Buenos Aires, Avellaneda, Vicente López, Gregorio de Laferrere, Merlo, José C. Paz, Quilmes, Banfield, Lanús Este, Lanús Oeste, González Catán, Isidro Casanova, Virrey Del Pino, Moreno, Berazategui, San Miguel, Monte Grande, Villa Madero, Santa María, Mor.
Ciudad de México	México	Ciudad de México, Ecatepec, Nezahualcóyotl, Naucalpan, Tlalnepantla, Chimalhuacan, López Mateos, Cuautitlan Izcalli, Xico, Ixtapaluca, La Cumbre, El Hielo, San José Tejamanil.
Ciudad de Ho Chi Minh	Vietnam	Ciudad Ho Chi Minh, Ciudad Thu Dau Mot, Gia Dinh, Ciudad Bien Hoa.

Etiqueta	País	Lista de nombres
Ciudad Quezon	Filipinas	Ciudad Quezon, Manila, Caloocan, Taguig, Antipolo, Pasig, Paranaque, Dasmaringas, Valenzuela, Bacoor, Las Pinas, Makati, San Jose del Monte, Muntinlupa, Calamba, Marikina, Pasay, Imus, Mandaluyong, Malabon, Santa Rosa, Biñan, San Pedro, General Trias, Cabuya.
Calcuta	India	Calcuta, Howrah, Chandannagar, Santragachi.
Casablanca	Marruecos	Casablanca, Mohammedia.
Chengdu	China	Chengdu, Shuangliu, Chongzhou, Qingbaijiang, Chenghua, Longquanyi, Qingyang, Jinjiang, Wuhou, Jinniu, Pidu, Xindu.
Chennai	India	Chennai.
Chicago	Estados Unidos	Chicago, Aurora, Naperville, Gary, Evanston.
Chittagong	Bangladés	Chittagong.
Chongqing	China	Chongqing, Yuzhong, Jiangbei, Banan, Shapingba, Dadukou, Jiulongpo, Yubei, Nan'an.
Colombo	Sri Lanka	BColombo, Sri Jayawardenepura Kotte, Kolonnawa, Kalutara, Negombo, Gampaha.
Comilla	Bangladés, India	Comilla, Chandpur.
Daca	Bangladés	Daca, Dhamrai, Narayanganj, Munshiganj.
Dallas	Estados Unidos	Dallas, Fort Worth, Arlington, Plano, Garland, Frisco, Mesquite, Lewisville, Cedar Hill, Irving.
Dar es Salaam	Tanzania	Dar es Salaam.
Dubai	Emiratos Árabes Unidos	Dubai, Sharjah, Ajman.
El Cairo	Egipto	El Cairo, Giza, Shubra al Khayma, Al-Obour, 15th of May City.
Estambul	Turquía	Estambul.
Guadalajara	México	Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá.
Guangzhou	China	Guangzhou, Shenzhen, Dongguan, Foshan, Jiangmen, Futian, Baoan, Pānyú, Shunde, Haizhu, Tianhe, Huangpu, Longgang, Luohu, Liwan, Yuexiu, Baiyun, Nanshan, Pingshan, Longhua, Guangming, Xinhui.
Hangzhou	China	Hangzhou, Shaoxing, Keqiao, Xiaoshan, Yuhang, Gongshu, Binjiang, Jianggan, Xiacheng, Shangcheng, Xihu.
Hanói	Vietnam	Hanói, T` Son.
Harbin	China	Harbin.

Etiqueta	País	Lista de nombres
Hefei	China	Hefei, Shushan, Baohe, Yaohai, Luyang, Feidong, Feixi.
Hong Kong	China	Hong Kong, New Territories, Kowloon.
Houston	Estados Unidos	Houston, Pasadena, The Woodlands, Sugar Land.
Hyderabad	India	Hyderabad.
Jartum	Sudán	Jartum, Omdurman.
Jieyang	China	Jieyang, Shantou, Chaozhou, Puning, Chaoyang, Jinping, Longhu.
Johannesburgo	Sudáfrica	Johannesburg, Soweto, Randburg, Roodepoort, Krugersdorp, Sandton.
Kabul	Afganistán	Kabul.
Kano	Nigeria	Kano.
Kanpur	India	Kanpur.
Karachi	Pakistán	Karachi.
Kinshasa	Rep. Dem. del Congo	Kinshasa.
Kuala Lumpur	Malasia	Kuala Lumpur, Kajang, Klang, Subang Jaya, Petaling Jaya, Selayang, Shah Alam, Ampang Jaya.
Lagos	Nigeria	Lagos.
Lahore	Pakistán	Lahore, Sheikhpura.
Lima	Perú	Lima.
Londres	Reino Unido	Londres, Westminster, Ciudad de Londres.
Los Angeles	Estados Unidos	Los Angeles, Long Beach, Anaheim, Santa Ana, Riverside, Irvine, Glendale, San Bernardino, Fontana, Huntington Beach, Ontario, Garden Grove, Rancho Cucamonga, Pomona, Corona, Torrance, Pasadena, Fullerton, Orange, Inglewood, Downey, El Monte, Costa Mesa.
Luanda	Angola	Luanda.
Madrid	España	Madrid, Móstoles, Fuenlabrada, Leganés, Getafe, Alcorcón, Parla, Torrejón de Ardoz, Alcobendas.
Medan	Indonesia	Medan, Binjai.
Miami	Estados Unidos	Miami, Hialeah, Fort Lauderdale, Kendall, Pompano Beach, Miami Beach, Boca Raton, Palm Beach.
Monterrey	México	Monterrey, Guadalupe, Apodaca, San Nicolas de los Garza, General Escobedo.
Moscú	Rusia	Moscú, Balashikha, Khimki, Podolsk, Korolyov, Lyubertsy, Mytishchi, Krasnogorsk, Shcholkovo, Pushkino, Dolgoprudny.

Etiqueta	País	Lista de nombres
Mumbai	India	Mumbai, Thane, Kalyan-Dombivli, Navi Mumbai, Mira-Bhayander, Ulhasnagar, Bhiwandi.
Nagoya	Japón	Nagoya, Gifu, Okazaki, Ichinomiya, Yokkaichi, Kasugai, Suzuka, Anjo, Nishio, Ogaki, Kariya, Komaki, Kakamigahara, Kuwana, Inazawa, Seto, Handa, Tokai, Obu, Nissin, Ama, Kitanagoya, Chita, Owariasahi, Inuyama, Hekinan, Chiryu, Kiyosu, Hashima, Miyoshi, Tsu.
Nairobi	Kenia	Nairobi.
Nankín	China	Nanjing, Jiangning.
Nueva Delhi	India	Delhi, Gurugram, Ghaziabad, New Delhi, Faridabád, Noida.
Nueva York	Estados Unidos	Nueva York, Islip, Newark, Jersey City, Yonkers, Huntington, Paterson, Stamford, Elizabeth, New Brunswick.
Osaka	Japón	Osaka, Kobe, Kyoto, Himeji, Higashiosaka, Nishinomiya, Amagasaki, Hirakata, Toyonaka, Suita, Nara, Takatsuki, Akashi, Ibaraki, Yao, Kakogawa, Neyagawa, Itami, Kishiwada, Izumi, Kawanishi, Moriguchi, Minoh, Kashihara, Kadoma, Daito, Matsubara, Ikoma, Tonda.
París	Francia	Paris, Boulogne-Billancourt, Saint-Denis, Montreuil.
Pekín	China	Pekín; Chaoyang; Daxing; Dongcheng; Fengtai; Fangshan; Haidian; Mentougou; Shijingshan; Tongzhou; Xicheng.
Pune	India	Pune.
Quanzhou	China	Quanzhou, Jinjiang, Shishi, Licheng, Fengze, Luojiang.
Rangún	Birmania	Rangún.
Rio de Janeiro	Brasil	Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Nova Iguaçu, Belford Roxo, Sao Joao de Meriti, Mesquita, Nilópolis, Queimados.
Riyadh	Arabia Saudita	Riyadh.
San Jose	Estados Unidos	San Jose, San Francisco, Oakland, Fremont, Sunnyvale, Hayward, Berkeley, Santa Clara, San Mateo, Richmond, Mountain View, Redwood City, Alameda, Palo Alto.
San Petesburgo	Rusia	San Petesburgo.
Santiago de Chile	Chile	Santiago de Chile.
Santo Domingo	República Dominicana	Santo Domingo.

Etiqueta	País	Lista de nombres
São Paulo	Brasil	São Paulo, Guarulhos, Sao Bernardo do Campo, Osasco, Santo Andre, Mauá, Mogi das Cruzes, Diadema, Carapicuíba, Itaquaquecetuba, Taboão da Serra, Suzano, Barueri, Embu das Artes, Cotia, Itapevi, Ferraz de Vasconcelos, São Caetano do Sul, Santana de Parnaíba.
Shanghái	China	Shanghai, Fengxian, Pudong, Baoshan, Putuo, Changning, Hongkou, Huangpu, Jiading, Jing'an, Qingpu, Taicang, Songjiang, Xuhui, Yangpu, Minhang.
Shenyang	China	Shenyang, Yuhong, Sujiatun, Heping, Hunnan, Shenhe, Dadong, Tiexi, Huanggu.
Sídney	Australia	Sídney.
Singapur	Singapur, Malasia	Singapur, Johor Bahru, Pasir Gudang.
Surabaya	Indonesia	Surabaya, Malang, Batu.
Surat	India	Surat.
Suzhou	China	Suzhou, Wuxi, Kunshan, Wuzhong, Wujiang, Gusu, Xiangcheng.
Taipéi	Taiwán	Taipéi, Taipei, Taoyuan, Keelung.
Teherán	Irán	Teherán, Karaj, Eslamshahr, Qods, Shahriyar.
Tianjin	China	Tianjin, Xiqing, Nankai.
Tijuana	EUA, México	Tijuana, San Diego, Chula Vista, Oceanside, Escondido, El Cajon, Vista, Poway.
Tokio	Japón	Tokyo, Yokohama, Kawasaki, Saitama, Chiba, Setagaya, Nerima, Ota, Sagamihara, Edogawa, Adachi, Funabashi, Itabashi, Kawaguchi, Hachioji, Suginami, Koto, Ichikawa, Katsushika, Machida, Fujisawa, Kashiwa, Shinagawa, Kita, Koshigaya, Tokorozawa, Kawagoe, Nak.
Toronto	Canadá	Toronto, Mississauga, Brampton, Hamilton, Markham, Vaughan, Burlington, Ajax, Pickering.
Wenzhou	China	Wenzhou, Rui'an, Longwan, Lucheng, Ouhai.
Wuhan	China	Wuhan, Jiang'an.
Xiamen	China	Xiamen, Tong'an, Siming, Haicang, Huli, Jimei.
Xi'an	China	Xi'an, Xianyang.
Yakarta	Indonesia	Jakarta, Bekasi, Tangerang, Depok, South Tangerang, Bogor, Serang, Sukabumi, Karawang, Cianjur.
Yogyakarta	Indonesia	Yogyakarta, Surakarta.
Zhengzhou	China	Zhengzhou, Huiji, Zhongyuan, Erqi.

B Acuerdos y tratados internacionales sobre cambio climático

Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional adoptado el 12 de diciembre de 2015 por 192 países en la COP21 en París. Tiene diferentes metas a largo plazo para guiar a las naciones en la reducción de emisiones de GEI y limitar la temperatura global a 2°C, además de proporcionar ayuda financiera a los países en desarrollo con el fin de realizar acciones de adaptación y mitigación del cambio climático. Consiste en periodos de cada cinco años donde se revisan los planes nacionales (CDN) [127].

Protocolo de Montreal

Es un acuerdo ambiental internacional adoptado en 1987 y con ratificación universal en 2009. Tiene el propósito de proteger la capa de ozono terrestre al exigir el control de casi 100 sustancias químicas destructoras del ozono con el objetivo de eliminarlas gradualmente por completo. Los objetivos del Protocolo de Montreal se han cumplido en la mayoría de los casos y se considera como uno de los acuerdos internacionales con relación al cambio climático más exitosos [128].

Protocolo de Kioto

Es un acuerdo internacional creado para reducir las emisiones de efecto invernadero. Fue adoptado el 11 de diciembre de 1997, con un periodo de 2005 a 2013 y un periodo de 2013 a 2020. El protocolo cubre las emisiones de los seis primeros gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, y hexafluoruro de azufre. Los países deben cumplir sus objetivos principalmente a través de medidas nacionales e informar periódicamente también, se ofrece un medio adicional para cumplir sus objetivos mediante el comercio internacional de emisiones, el mecanismo de desarrollo limpio y la aplicación conjunta [129].

Agenda 2030 para el desarrollo sostenible

Es un plan de desarrollo enfocado en las personas, el planeta y la prosperidad, se enfoca en fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. Reconoce que erradicar la pobreza en todas sus formas y dimensiones, incluida la pobreza extrema, es el mayor

desafío global y un requisito indispensable para el desarrollo sostenible. Contiene 17 objetivos con 169 metas que abarcan las esferas ambiental, económica y social. Se adoptó el 15 de septiembre de 2015 y es un plan a 15 años para guiar a los planes de desarrollo de las naciones [66].

Marco Sendai para la Reducción de Riesgo de Desastres

Se adoptó en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas celebrada en Sendai (Japón) el 18 de marzo de 2015. Se enfoca en adoptar medidas sobre las tres dimensiones del riesgo de desastre (exposición a amenazas, vulnerabilidad y capacidad, y características de las amenazas). Tiene el fin de prevenir la creación de nuevos riesgos, reducir los riesgos existentes y aumentar la resiliencia de las sociedades. Contiene 7 metas y 38 indicadores que miden los avances de los países [130].

Agenda Addis Abeba

La Agenda de Acción de Addis Abeba es una agenda internacional enfocada en el desarrollo y en la promoción del desarrollo sostenible [131]. Fue adoptada por la Tercera Conferencia Internacional sobre la Financiación para el Desarrollo reunida en Addis Abeba en julio de 2015. Contiene siete esferas donde se deben concentrar los esfuerzos: protección social y servicios públicos para todos, poner fin al hambre y la malnutrición, superación de carencias en materia de infraestructura, industrialización inclusiva y sostenible, empleo pleno y productivo, trabajo decente para todos, promoción de las micro, pequeñas y medianas empresas, protección de ecosistemas y promoción de sociedades pacíficas e inclusivas.

Declaración de Río

La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo se adoptó en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en Río de Janeiro en junio de 1992 [132]. En esta declaración se consolidó el concepto de desarrollo sostenible. El informe incluye 27 principios donde se aborda el reto de generar un modelo de desarrollo global que sea capaz de asegurar el desarrollo económico, el bienestar social y ambiental de la humanidad. Se planteó el desarrollo sustentable como la única estrategia a seguir para asegurar un desarrollo ambientalmente adecuado.

Nueva Agenda Urbana

La Nueva Agenda Urbana se aprobó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III) celebrada en Quito, el 20 de octubre de 2016. Proporciona los principios y prácticas para lograr un futuro mejor y más sostenible, enfocándose en la igualdad de derechos y de acceso a los beneficios y oportunidades que las ciudades pueden ofrecer, y en donde se considere a los sistemas urbanos como un medio para lograrlo [65].

C Resultados del análisis estadístico y tablas del índice compuesto

Figura C.1: *Scree plot* del análisis por componentes principales para la base de datos utilizada.

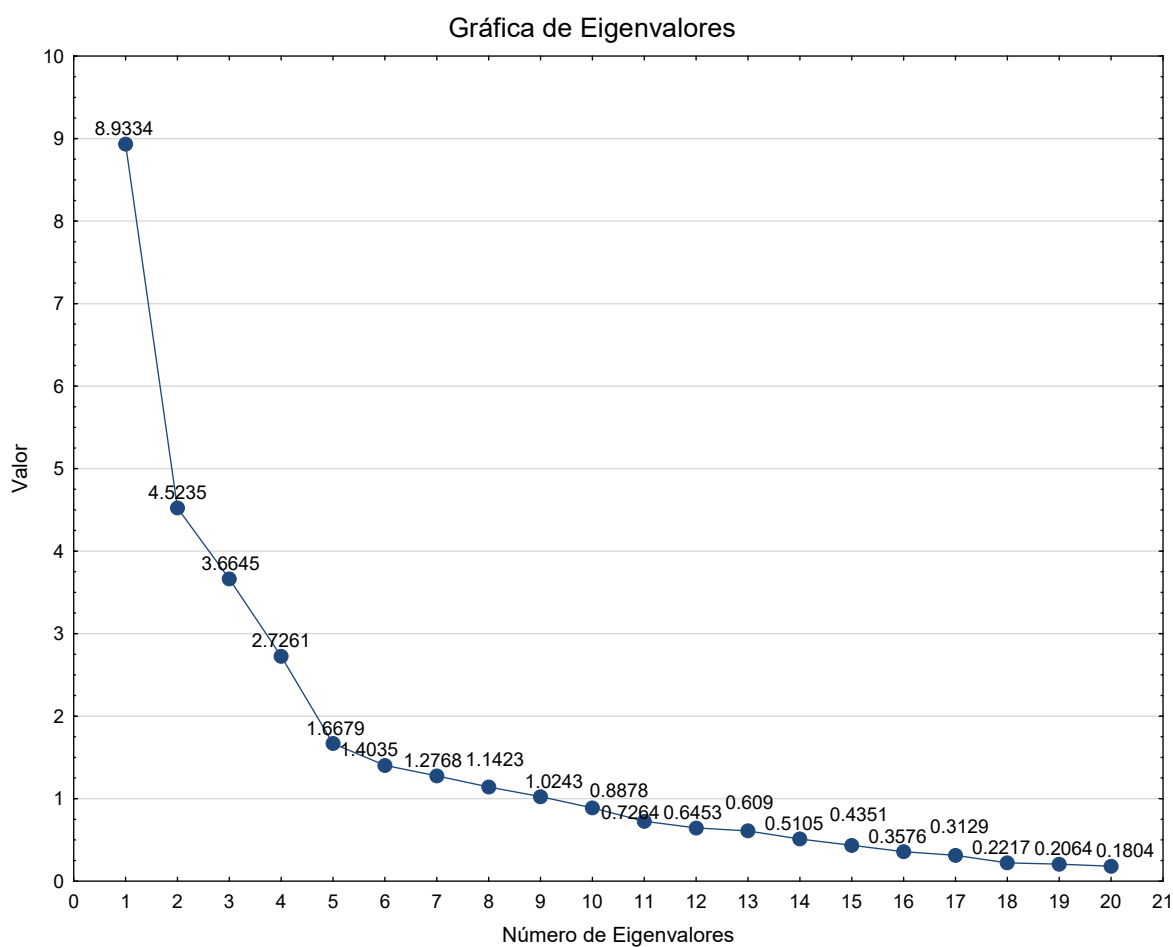


Tabla C.1: Peso de los factores para las 9 componentes principales, rotadas con el método *varimax normalizado*. Las entradas mayores a 0.6 se presentan en color rojo.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
AREA	0.84	0.31	0.20	0.12	0.27	0.01	0.09	0.10	0.13
EL_AV_ALS	0.09	-0.22	-0.25	-0.01	-0.32	0.20	-0.45	-0.45	0.25
E_WR_P_14	0.07	0.05	0.60	-0.34	0.35	0.17	0.04	-0.27	-0.21
E_WR_T_14	0.00	-0.07	0.01	-0.81	0.14	-0.19	0.14	0.04	-0.16
B15	0.83	0.16	0.09	0.35	0.27	-0.07	0.15	0.03	0.14
P15	0.66	0.49	-0.05	-0.19	0.18	0.22	-0.18	0.04	-0.09
BUCAP15	0.46	-0.18	0.25	0.52	0.05	-0.25	0.39	0.05	0.15
NTL_AV	0.05	-0.13	-0.31	0.51	-0.02	-0.48	-0.42	0.11	-0.09
GDP15_SM	0.69	0.23	-0.03	0.33	0.37	0.05	-0.20	-0.02	-0.11
INCM_CMI	0.22	-0.04	-0.03	0.80	0.23	-0.15	0.05	0.15	-0.07
DEV_CMI	0.32	-0.13	0.07	0.74	0.18	-0.13	0.21	0.06	0.05
TT2CC	0.17	-0.01	-0.11	0.12	0.05	-0.18	0.76	-0.12	0.00
E_GR_AV14	0.12	0.06	0.95	0.04	0.07	-0.02	0.10	-0.10	0.02
E_GR_AH14	0.47	0.05	0.69	0.00	0.21	0.03	-0.15	0.19	0.23
E_GR_AM14	0.78	0.15	0.01	0.27	0.13	0.02	0.29	-0.15	-0.08
E_GR_AL14	0.44	0.02	-0.59	0.05	0.27	-0.04	-0.18	0.42	0.12
E_GR_AT14	0.84	0.31	0.20	0.12	0.27	0.01	0.09	0.10	0.13
E_EC2E_TOT	0.24	0.75	-0.09	0.29	0.32	-0.02	-0.11	-0.12	-0.08
E_CPM2_TOT	0.04	0.82	-0.04	0.10	0.18	-0.01	-0.01	-0.24	-0.11
E_CPM2_T14	-0.35	0.48	-0.27	-0.19	-0.14	0.04	0.11	0.22	0.14
EX_FD_AREA	0.26	0.86	0.15	-0.17	-0.01	0.00	0.05	0.10	0.04
EX_FD_B15	0.25	0.91	0.04	0.02	0.07	0.01	0.06	0.00	0.02
EX_FD_P15	0.18	0.90	0.07	-0.16	-0.04	-0.02	0.01	0.06	0.04
EX_SS_AREA	0.34	0.10	0.13	0.09	0.87	0.09	0.08	-0.02	0.10
EX_SS_B15	0.36	0.05	0.08	0.16	0.82	0.04	0.07	-0.02	0.15
EX_SS_P15	0.26	0.14	0.07	-0.08	0.84	0.28	0.00	-0.04	-0.07
EX_EQ19PGA	0.14	-0.08	-0.04	0.02	0.22	0.87	-0.20	0.12	-0.07
EX_EQ19MMI	-0.06	0.04	0.02	-0.07	0.10	0.92	-0.07	0.07	0.09
EX_HW_IDX	0.05	-0.08	-0.01	0.06	-0.10	0.17	-0.10	0.64	-0.10
SDG_LUE9015	0.10	-0.01	0.07	0.05	0.10	0.04	-0.01	-0.12	0.87
SDG_A2G14	0.09	-0.03	0.90	-0.03	0.04	-0.04	-0.10	0.18	0.09
SDG_OS15MX	-0.30	0.00	0.34	-0.60	0.06	0.00	-0.29	0.19	0.15
Expl. Var.	5.25	4.58	3.49	3.47	3.24	2.26	1.63	1.25	1.21
Prp. Total	0.16	0.14	0.11	0.11	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04

Tabla C.2: Comparación entre el índice de sustentabilidad (I), el aumento de la temperatura (T) en °C y el cambio relativo en % de la precipitación (P) para finales de siglo de acuerdo al escenario RCP2.6.

Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P
Bandung	0.875	0.83	-1.71	C. Quezon	0.625	0.78	2.65	A. Abeba	0.625	1.07	4.16	Daca	0.375	0.99	4.39
Johannesburgo	0.875	1.27	-2.88	CDMX	0.625	1.12	0.25	Yakarta	0.5	0.84	-0.58	Pekín	0.375	1.36	7.9
Belo Horizonte	0.875	1.04	1.62	São Paulo	0.625	1.00	1.66	Tokio	0.5	1.07	3.35	Jieyang	0.375	1.07	2.55
Argel	0.875	1.09	-2.57	Los Angeles	0.625	1.13	0.08	Mumbai	0.5	0.92	7.39	Lahore	0.375	1.31	11.64
Sídney	0.875	0.96	-4.5	Estambul	0.625	1.23	-0.17	Nueva York	0.5	1.39	3.38	Chennai	0.375	0.77	7.45
Buenos Aires	0.75	0.72	3.52	Moscú	0.625	1.63	6.83	Bangkok	0.5	1.00	0.59	Suzhou	0.375	1.28	4.32
Rio de Janeiro	0.75	0.89	-1.31	Bangalore	0.625	0.94	6.73	Teherán	0.5	1.34	3.32	Nagoya	0.375	1.12	4.14
Taipéi	0.75	0.96	2	París	0.625	1.04	1.65	Lagos	0.5	0.93	1.6	Wuhan	0.375	1.34	6.8
Bogota	0.75	1.09	-0.02	Londres	0.625	0.95	1.88	Ho C. M.	0.5	0.85	1.54	Shenyang	0.375	1.39	9.11
Singapur	0.75	0.82	1.36	Chengdu	0.625	1.32	6.13	Surabaya	0.5	0.81	-1.94	Nankín	0.375	1.30	5.35
K. Lumpur	0.75	0.85	1.75	Lima	0.625	1.07	11.05	Hyderabad	0.5	0.97	5.76	Baghdad	0.375	1.33	5
Toronto	0.75	1.56	3.95	Chicago	0.625	1.52	3.52	Hangzhou	0.5	1.25	4.36	Dubai	0.375	1.12	16.08
Hong Kong	0.75	1.07	2.73	Ahmedabad	0.625	1.08	16.25	Luanda	0.5	0.85	1.78	Tijuana	0.375	1.11	-0.3
Rangún	0.75	0.95	3.61	Santiago	0.625	0.87	-2.82	Pune	0.5	0.91	4.06	Zhengzhou	0.375	1.34	5.91
Kinshasa	0.75	1.07	-0.43	Alejandro	0.625	1.04	0.01	Tianjin	0.5	1.40	8.92	Harbin	0.375	1.40	7.42
D. es Salaam	0.75	0.81	0.23	Miami	0.625	0.85	2.39	Comilla	0.5	0.95	4.4	Quanzhou	0.375	1.07	3.13
Madrid	0.75	1.26	-0.91	Dallas	0.625	1.21	2.06	Riyadh	0.5	1.35	10.8	Calcuta	0.25	0.99	5.42
Chongqing	0.75	1.33	6.29	Yogyakarta	0.625	0.81	-2.34	Hanói	0.5	1.16	-0.09	El Cairo	0.25	1.16	4.88
Guadalajara	0.75	1.03	-1.05	San Jose	0.625	1.16	1.59	Chittagong	0.5	1.01	5.02	Karachi	0.25	0.99	8.72
S. Petesburgo	0.75	1.60	6.86	Abiyán	0.625	0.87	2.35	Xi'an	0.5	1.30	4.53	Jartum	0.25	1.14	8.24
Nairobi	0.75	0.89	9.69	Acra	0.625	0.89	2.13	Houston	0.5	1.04	1.29	Surat	0.25	0.99	13.29
Medan	0.75	0.82	2.29	Kabul	0.625	1.47	1.97	Wenzhou	0.5	1.10	3.45	N. Delhi	0.125	1.16	9.4
Sto. Domingo	0.75	0.85	-1.62	Colombo	0.625	0.80	7.05	Kano	0.5	1.09	1.2	Osaka	0.125	1.12	4.16
Barcelona	0.75	1.07	2.52	Monterrey	0.625	1.10	1.17	Xiamen	0.5	1.04	3.45	Kanpur	0.125	1.08	9.23
Shanghái	0.625	1.25	3.98	Casablanca	0.625	0.98	-7.45	Hefei	0.5	1.31	6.18	Guangzhou	0	1.17	2.29

Tabla C.3: Comparación entre el índice de sustentabilidad (I), el aumento de la temperatura (T) en °C y el cambio relativo en % de la precipitación (P) para finales de siglo de acuerdo al escenario RCP8.5.

Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P	Ciudad	I	T	P
Bandung	0.875	3.32	1.08	C. Quezon	0.625	3.10	9.63	A. Abeba	0.625	4.37	16.93	Daca	0.375	3.87	18.15
Johannesburgo	0.875	5.11	-12.73	CDMX	0.625	4.46	-10.88	Yakarta	0.5	3.40	3.18	Pekín	0.375	5.11	22.80
Belo Horizonte	0.875	4.21	2.94	São Paulo	0.625	3.73	8.99	Tokio	0.5	4.03	5.36	Jieyang	0.375	3.71	2.58
Argel	0.875	4.29	-29.69	Los Angeles	0.625	3.91	-2.83	Mumbai	0.5	3.67	33.53	Lahore	0.375	5.18	17.54
Sídney	0.875	3.75	-0.75	Estambul	0.625	4.44	-11.97	Nueva York	0.5	4.84	9.95	Chennai	0.375	3.13	23.97
Buenos Aires	0.75	2.96	11.47	Moscú	0.625	5.72	13.11	Bangkok	0.5	3.76	5.29	Suzhou	0.375	4.55	6.11
Rio de Janeiro	0.75	3.17	0.31	Bangalore	0.625	3.68	20.13	Teherán	0.5	5.15	-2.90	Nagoya	0.375	4.23	7.63
Taipéi	0.75	3.34	0.72	París	0.625	4.11	-3.45	Lagos	0.5	3.58	4.87	Wuhan	0.375	4.79	9.21
Bogota	0.75	4.02	4.23	Londres	0.625	3.63	2.12	H. C. M.	0.5	3.43	6.53	Shenyang	0.375	5.36	19.81
Singapur	0.75	3.28	4.45	Chengdu	0.625	4.64	8.22	Surabaya	0.5	3.33	3.00	Nankín	0.375	4.71	9.08
K. Lumpur	0.75	3.49	8.47	Lima	0.625	4.07	32.75	Hyderabad	0.5	3.92	29.03	Baghdad	0.375	5.43	-1.07
Toronto	0.75	5.52	11.22	Chicago	0.625	5.34	11.05	Hangzhou	0.5	4.51	4.50	Dubai	0.375	4.55	13.11
Hong Kong	0.75	3.64	3.08	Ahmedabad	0.625	4.44	52.13	Luanda	0.5	3.42	5.25	Tijuana	0.375	3.91	-3.84
Rangún	0.75	3.67	10.04	Santiago	0.625	3.57	-21.45	Pune	0.5	3.64	34.71	Zhengzhou	0.375	4.74	21.66
Kinshasa	0.75	4.15	0.33	Alejandro	0.625	3.88	-25.66	Tianjin	0.5	5.05	23.79	Harbin	0.375	5.68	17.98
D. es Salaam	0.75	3.22	-2.38	Miami	0.625	3.47	-2.65	Comilla	0.5	3.88	22.92	Quanzhou	0.375	3.73	2.77
Madrid	0.75	5.06	-20.99	Dallas	0.625	4.69	-2.52	Riyadh	0.5	5.58	21.90	Calcuta	0.25	3.73	23.22
Chongqing	0.75	4.68	5.67	Yogyakarta	0.625	3.32	3.61	Hanói	0.5	4.07	3.45	El Cairo	0.25	4.52	-14.3
Guadalajara	0.75	4.53	-14.90	San Jose	0.625	3.83	4.39	Chittagong	0.5	3.71	21.43	Karachi	0.25	4.09	26.22
S. Petesburgo	0.75	5.77	16.73	Abiyán	0.625	3.27	9.01	Xi'an	0.5	4.72	13.30	Jartum	0.25	4.81	29.28
Nairobi	0.75	3.88	22.48	Acra	0.625	3.37	15.17	Houston	0.5	4.02	-4.08	Surat	0.25	4.11	49.89
Medan	0.75	3.42	7.95	Kabul	0.625	5.77	-7.48	Wenzhou	0.5	3.91	1.86	N. Delhi	0.125	4.87	17.53
Sto. Domingo	0.75	3.25	-23.73	Colombo	0.625	3.18	21.03	Kano	0.5	4.40	13.28	Osaka	0.125	4.27	8.30
Barcelona	0.75	3.98	-18.01	Monterrey	0.625	4.59	-9.17	Xiamen	0.5	3.70	3.98	Kanpur	0.125	4.55	28.92
Shanghái	0.625	4.33	5.40	Casablanca	0.625	3.67	-37.89	Hefei	0.5	4.75	9.94	Guangzhou	0	3.99	4.10

D Glosario de abreviaturas

Abreviatura	Descripción
CDN	Contribuciones Nacionalmente Determinadas
CP	Componente principal
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization en inglés)
GEI	Gases de efecto invernadero
GHSL	Capa Global de Asentamientos Humanos (Global Human Settlement Layer en inglés)
ICU	Isla de calor urbana
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change en inglés)
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
NUA	Nueva Agenda Urbana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ONG	Organización no gubernamental
PM	Materia particulada
RCP	Trayectoria de Concentración representativa (Representative Concentration Pathway en inglés)
RNB	Renta Nacional Bruta
UCDB	Base de Datos de los Centros Urbanos (Urban Center Database en inglés)

Bibliografía

- [1] Comisión Europea, “Applying the Degree of Urbanisation - A methodological manual to define cities, towns and rural areas for international comparisons”, 2021.
- [2] IPCC, “Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, 2014. [Equipo de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [3] Leff, E., *Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. Siglo XXI de España Editores, S.A., 2002.
- [4] Tangencial, “Manifiesto por la vida: por una ética para la sustentabilidad”, *Ambiente & Sociedades*, vol. 5, no. 10, pp. 1–14, 2002.
- [5] Lindsey, R., “Climate and Earth’s energy budget”, *NASA Earth Observatory*, vol. 680, 2009.
- [6] National Weather Service, “The Earth-Atmosphere Energy Balance”, <https://www.weather.gov/jetstream/energy>, 2019.
- [7] NASA, “Climate Change Evidence: How Do We Know?”, <https://climate.nasa.gov/evidence/>.
- [8] Lindsey, R., “Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide”, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>, 2020.
- [9] Luthi, D. *et al.*, “High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present”, *Nature*, vol. 453, no. 7193, pp. 379–382, 2008.
- [10] Tans, P. y Keeling, R., “Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases”, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>, 2020.
- [11] Etheridge, D. *et al.*, “Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in antarctic ice and firn”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 101, no. D2, pp. 4115–4128, 1996.
- [12] Reay, D., Smith, P., y Van Amstel, A., *Methane and climate change*. Earthscan, 2010.
- [13] Skiba, U. *et al.*, “Nitrous oxide, climate change and agriculture”, *CAB Rev*, vol. 9, no. 10, pp. 1–7, 2014.
- [14] NOAA, “Climate Forcing”, <https://www.climate.gov/maps-data/primer/climate-forcing>.
- [15] Samaniego, J. *et al.*, “Panorama de las contribuciones determinadas a nivel nacional en América Latina y el Caribe, 2019”, 2019.
- [16] Tariq, K. y Tabary, M., “Five forest figures for the International Day of Forests”, <https://blogs.worldbank.org/opendata/five-forest-figures-international-day-forests>, 2016.
- [17] Tollefson, J., “Humans are driving one million species to extinction”, *Nature*, 05 2019.

- [18] OMS, “9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action”, 2018.
- [19] Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, “The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk”, 2012.
- [20] Geyer, R., Jambeck, J. R., y Law, K. L., “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Science advances*, vol. 3, no. 7, 2017.
- [21] Grupo Independiente de Científicos designado por el Secretario General, “Global Sustainable Development Report 2019: The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development”, 2019.
- [22] NOAA, “Climate change impacts”, <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/climate-change-impacts>, 2019.
- [23] Jackson, R., “The Effects of Climate Change”, <https://climate.nasa.gov/effects/>.
- [24] ONU-Habitat, “World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization”, 2020.
- [25] ONU-Habitat, “What is a city?”, 2020.
- [26] Osmont, A., “Ciudad y economía: la ciudad eficiente”, *Cuadernos de la CEPAL*, 2003.
- [27] Milasi, S. y Stefan, K., “World employment and social outlook: Trends 2019”, 2019.
- [28] Banco Mundial, “Cities in transition: World bank urban and local government strategy”, *Urban Development Division, Infrastructure Group. Washington, DC*, 2000.
- [29] Organización Internacional para las Migraciones, “Informe sobre las migraciones en el mundo”, 2015.
- [30] Ramírez, R., “Ciudad y pobreza: El paradigma cualitativo de la pobreza urbana”, *Cuadernos de la cepal*, 2003.
- [31] Verhoef, E. T. y Nijkamp, P., “Externalities in the urban economy”, 2003.
- [32] Bezerra, L., “Global report on human settlements 2009: planning sustainable cities”, 2010. Editado por el Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- [33] Naciones Unidas, “2018 Revision of World Urbanization Prospects”, 2018.
- [34] Zhang, L. *et al.*, “The changing PM_{2.5} dynamics of global megacities based on long-term remotely sensed observations”, *Environment International*, vol. 142, 2020.
- [35] Carou, H. C. y Bringel, B., “Articulaciones del sur global: afinidad cultural, internacionalismo solidario e iberoamérica en la globalización contrahegemónica”, *Geopolítica (s). Revista de estudios sobre espacio y poder*, vol. 1, no. 1, pp. 41–63, 2010.
- [36] Organización de las Naciones Unidas, “Cities and pollution”, <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>.
- [37] Estrada, F., Botzen, W. W., y Tol, R. S., “A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts”, *Nature Climate Change*, vol. 7, no. 6, pp. 403–406, 2017.
- [38] EPA, “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies”, 2008.
- [39] Munich Re Group, “Megacities – Megarisks. Trends and challenges for insurance and risk management”, 2011.
- [40] Simioni, D., “Ciudad y desastres naturales: planificación y vulnerabilidad urbana”, *Cuadernos de la CEPAL*, 2003.

- [41] García, M. L. y Vergara, J. M. R., “La evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza”, *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, pp. 473–486, 2000.
- [42] Spindler, E., “The History of Sustainability”, *Sustainability in Tourism*, pp. 9–31, 2013.
- [43] Quiroz, I. *et al.*, “Desarrollo sustentable, ¿Discurso político o necesidad urgente?”, *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana*, vol. 24, no. 3, pp. 5–11, 2011.
- [44] James, P. y Magee, L., “Domains of sustainability”, *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance; Springer*, pp. 1–17, 2016.
- [45] Carson, R., *Silent spring*. Houghton Mifflin Harcourt, 2002.
- [46] Meadows, D. H. *et al.*, *The limits to Growth*. Potomac Associates – Universe Books, 1972.
- [47] PNUMA/UNCTAD, “Declaración de Cocoyoc”, 1974.
- [48] Echenberg, M. y García-González, D. E., *Repensando la sostenibilidad desde las humanidades y las ciencias sociales: definiciones, problemas y miradas desde Latinoamérica: un abordaje bibliográfico-crítico*. Bonilla Artigas Editores, 2018.
- [49] Domínguez, R. y Caria, S., “Raíces latinoamericanas del otro desarrollo: estilos de desarrollo y desarrollo a escala humana”, *América Latina en la historia económica*, vol. 25, no. 2, pp. 175–209, 2018.
- [50] UNESCO, “Sustainable development”, <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd>.
- [51] Portney, K., *Sustainability*. MIT Press, 2015.
- [52] Rauchecker, M. y Chan, J., *Sustentabilidad desde abajo: Luchas desde el género y la etnicidad*. CLACSO, 2017.
- [53] Cárdenas-Jirón, L. A., “Definición de un marco teórico para comprender el concepto del desarrollo sustentable”, *Revista de urbanismo*, vol. 13, no. 33, 1998.
- [54] Toledo, V. y Espejel, B., *México, Regiones Que Caminan Hacia la Sustentabilidad. Una geopolítica de las resistencias bioculturales*. Universidad Iberoamericana Puebla, 2014.
- [55] UNESCO, *Educación para el desarrollo sostenible*. UNESCO, 2012.
- [56] Colell, A. M., “Elogio del crecimiento económico”, in *El mundo que viene*, pp. 189–220, Alianza, 1994.
- [57] Adán, J. M. P., “Tecnología y desarrollo: una crítica de la sostenibilidad”, *Inguruak: Revista vasca de sociología y ciencia política*, no. 14, pp. 177–196, 1996.
- [58] Toledo, V., “Universidad y Sociedad Sustentable. Una propuesta para el nuevo milenio”, *Tópicos en Educación Ambiental*, vol. 2, 2000.
- [59] Villasante, T., “Procesos de planificación participativa para la sustentabilidad”, *Cuadernos CIMAS-Observatorio Internacional de Ciudadanía y Medio Ambiente Sostenible.*, 2006.
- [60] Leff, E., “Pensamiento Ambiental Latinoamericano: patrimonio de un saber para la sustentabilidad”, *Environmental Ethics*, vol. 34, pp. 97–112, 2012.
- [61] Weaver, P. y Rotmans, J., “Integrated sustainability assessment: what is it, why do it and how?”, *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, vol. 1, no. 4, 2006.
- [62] Escobar, A., *Sentipensar con la tierra*. Ediciones Unaula, 2014.

- [63] Toledo, V., “¿De qué hablamos cuando hablamos de sustentabilidad? Una propuesta ecológico política”, *Revista Internacional de Salarios Dignos*, vol. 1, no. 02, pp. 61–85, 2019.
- [64] Burgess, R., “Ciudad y sostenibilidad: Desarrollo urbano sostenible”, *Cuadernos de la CEPAL*, 2003.
- [65] ONU-Habitat, “Nueva Agenda Urbana”, 2017.
- [66] Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas, “Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development”, 2015.
- [67] Sachs, J. D. *et al.*, “Six transformations to achieve the sustainable development goals”, *Nature Sustainability*, vol. 2, no. 9, pp. 805–814, 2019.
- [68] DNV GL, “Future of Spaceship Earth: The Sustainable Development Goals”, 2016.
- [69] Nicolai, S. *et al.*, “Projecting Progress: Reaching the SDGs by 2030”, 2015.
- [70] Fernández, R., “Ciudades al borde del colapso.”, *Perspectivas Urbanas*, no. 6.
- [71] Graham, S., “Cyberspace and the city”, *T AND CP*, vol. 64, pp. 198–198, 1995.
- [72] European Commission, “GHSL - Global Human Settlement Layer”, <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/index.php>, 2020.
- [73] <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [74] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>.
- [75] Florczyk, A. *et al.*, “Description of the GHS Urban Centre Database 2015, Public Release 2019, Version 1.0”, 2019. Publicaciones de la Oficina de la Unión Europea, Luxemburgo.
- [76] Coneval, “Manual para el diseño y la construcción de indicadores. instrumentos principales para el monitoreo de programas sociales de México”, 2013.
- [77] Ibáñez-Pérez, R. M., “Indicadores de sustentabilidad: utilidad y limitaciones”, *Teoría y Praxis*, no. 11, pp. 102–126, 2012.
- [78] Achkar, M., “Indicadores de sustentabilidad”, 2005.
- [79] Florczyk, A. *et al.*, “GHS Urban Centre Database 2015, multitemporal and multidimensional attributes, R2019A.”, 2019.
- [80] Kopparapu, R. *et al.*, “Designing a centrifugal pump system for high altitude water crises”, 2017.
- [81] Kocornik-Mina, A. *et al.*, “Flooded cities”, *American Economic Journal: Applied Economics*, vol. 12, no. 2, pp. 35–66, 2020.
- [82] Tadono, T. *et al.*, “Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. 4, 2014.
- [83] Fujibe, F., “Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring”, *International Journal of Climatology*, vol. 31, no. 2, pp. 162–173, 2011.
- [84] Tabari, H., “Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability”, *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [85] Harris, I. *et al.*, “Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset”, *International Journal of Climatology*, vol. 34, no. 3, pp. 623–642, 2013.
- [86] Meyer, W. B. y Turner, B. L., “Human population growth and global land-use/cover change”, *Annual review of ecology and systematics*, vol. 23, no. 1, pp. 39–61, 1992.
- [87] Elvidge, C. *et al.*, “The Night Light Development Index: a spatially explicit measure of human development from satellite data”, *Social Geography*, vol. 7, no. 1, pp. 23–35, 2012.

- [88] NOAA, “Earth Observation Group - Defense Meteorological Satellite Program, Boulder”, https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html#NTL_2015, 2019.
- [89] Kummu, M. *et al.*, “Dryad Data – Gridded global datasets for Gross Domestic Product and Human Development Index over 1990-2015”, 2020.
- [90] Weiss, D. *et al.*, “A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015”, *Nature*, vol. 553, no. 7688, pp. 333–336, 2018.
- [91] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), “Metadata on SDGs Indicator 11.7.1 | Indicator category: Tier II”, 2020.
- [92] Salinas-Zavala, C. A. *et al.*, “Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California”, *Investigaciones Geográficas*, no. 94, pp. 82–90, 2017.
- [93] California Office of Environmental Health Hazard Assessment, “PM2.5”, <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>.
- [94] Crippa, M. *et al.*, “Gridded Emissions of Air Pollutants for the Period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2.”, *Earth System Science Data*, vol. 10, no. 4, pp. 1987–2013, 2018.
- [95] Institute for Health Metrics and Evaluation, “Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Data Resources | GHDx”, <http://ghdx.healthdata.org/gbd-2017>, 2017.
- [96] Blaikie, P. *et al.*, *At risk: natural hazards, people’s vulnerability and disasters*. Routledge, 2005.
- [97] Nicholls, R. *et al.*, “Ranking of the world’s cities most exposed to coastal flooding today and in the future”, *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris*, 2007.
- [98] Dottori, F. *et al.*, “Flood hazard map of the world”, https://data.europa.eu/data/datasets/jrc-floods-floodmapgl_rpc100y-tif?locale=en, 2016.
- [99] Jarvis, A., Reuter, H., y Guevara, E., “CGIAR-CSI SRTM – SRTM 90m DEM Digital Elevation Database”, <https://srtm.csi.cgiar.org/>, 2008.
- [100] GEM, “Global Earthquake Model Foundation”, <https://www.globalquakemodel.org/>.
- [101] Seneviratne, S. *et al.*, “Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets”, *Nature*, vol. 529, no. 7587, pp. 477–483, 2016.
- [102] Russo, S. *et al.*, “Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades”, *Environmental Research Letters*, vol. 10, no. 12, p. 124003, 2015.
- [103] ONU-Habitat, “Metadata on SDGs Indicator 11.3.1 | Indicator category: Tier II”, 2021.
- [104] Jolliffe, I., *Principal Component Analysis*. Springer, 2a ed., 2002.
- [105] Jolliffe, I. y Cadima, J., “Principal component analysis: a review and recent developments”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2065, pp. 1 – 16, 2016.
- [106] UCLA: Statistical Consulting Group, “Principal Components (PCA) and Exploratory Factor Analysis (EFA) with SPSS”, <https://stats.idre.ucla.edu/spss/seminars/efa-spss/#s3>.
- [107] Aggarwal, C. y Reddy, C., *Data Clustering: Algorithms and Applications*. CRC Press, 2013.
- [108] Johnson, R. y Wichern, D., *Applied Multivariate Statistical Analysis (Classic Version)*. Pearson, 6a ed., 2018.
- [109] Everitt, B., Landau, S., Leese, M., y Stahl, D., *Cluster Analysis*. Wiley, 5a ed., 2011.

- [110] Estrada, F., Velasco, J. A., Martínez-Arroyo, A., y Calderón-Bustamante, O., “An analysis of current sustainability of Mexican cities and their exposure to climate change”, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, p. 25, 2020.
- [111] Organización Meteorológica Mundial, “KNMI Climate Change Atlas”, https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py?id=someone@somewhere, 2020.
- [112] Kaiser, H., “Alpha-reliability of components and factors”, *Unpublished manuscript, Bureau of Educational Research, College of Education, Univer. of Illinois*, 1957.
- [113] Gyourko, J. *et al.*, “Superstar cities”, *American Economic Journal: Economic Policy*, vol. 5, no. 4, pp. 167–99, 2013.
- [114] Bove, V. y Elia, L., “Migration, diversity, and economic growth”, *World Development*, vol. 89, pp. 227–239, 2017.
- [115] Nijman, J. y Wei, Y. D., “Urban inequalities in the 21st century economy”, *Applied Geography*, vol. 117, p. 102188, 2020.
- [116] Laurent, E. *et al.*, “Inequality as pollution, pollution as inequality”, tech. rep., 2014.
- [117] Romero Lankao, P., “Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?”, *Environment and Urbanization*, vol. 22, no. 1, 2010.
- [118] Faragallah, R., “The impact of productive open spaces on urban sustainability: The case of El Mansheya Square – Alexandria”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, 2018.
- [119] De la Paz, G., “La División Norte-Sur y los Estudios Internacionales”, *CONfinés de relaciones internacionales y ciencia política*, vol. 2, no. 4, pp. 111 – 114, 2006.
- [120] Hocking, B. y Smith, M., *World Politics: An Introduction to International Relations*. Routledge, 2a ed., 2016.
- [121] Del Prado, J., “La división Norte-Sur en las relaciones internacionales”, *Agenda Internacional*, vol. 5, no. 11, pp. 23–32, 1998.
- [122] Wang, S. *et al.*, “The impact of climate change on storm surges over Irish waters”, *Ocean Modelling*, vol. 25, no. 1-2, pp. 83–94, 2008.
- [123] Balbo, M., “Ciudad y descentralización: la gestión urbana descentralizada”, *Cuadernos de la CEPAL*, 2003.
- [124] Guo, Y. *et al.*, “Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study”, *PLOS Medicine*, vol. 15, 2018.
- [125] Gavin, D. G. *et al.*, “A statistical approach to evaluating distance metrics and analog assignments for pollen records”, *Quaternary Research*, vol. 60, no. 3, pp. 356–367, 2003.
- [126] Greenacre, M., “Measures of distance between samples: Euclidean”, 2008. Departamento de Estadística, Universidad de Stanford.
- [127] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, “El Acuerdo de París”, 2020.
- [128] Naciones Unidas, “The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer | Ozone Secretariat”, 2021.
- [129] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, “Kyoto Protocol - Targets for the first commitment period”, 2021.
- [130] Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, “¿Qué es el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres?”, 2020.
- [131] Asociación de Estados del Caribe, “La Agenda de Acción de Addis Abeba y el Caribe”, 2012.
- [132] Naciones Unidas, “Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo”, 1992.