

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA**

**RELACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO ATMOSFÉRICO Y LA DENSIDAD DE ARBOLADO
EN ZONAS URBANAS**

POR:

M.C. JORGE DAMASO GONZÁLEZ ORTIZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR IN PHILOSOPHIA**

Chihuahua, Chih., México

Octubre de 2024



Relación del dióxido de carbono atmosférico y la densidad de arbolado en zonas urbanas, tesis presentada por Jorge Damaso González Ortiz como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Philosophia, ha sido aceptada y aprobada por:

[Handwritten signature]

D.Ph. Alfredo Pinedo Álvarez
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

[Handwritten signature]

Dra. Rosalía Sánchez Basualdo
Secretaría de Investigación y Posgrado

[Handwritten signature]

Dr. Lauro Manuel Espino Enríquez
Coordinador Académico

[Handwritten signature]

Dr. Martín Martínez Salvador
Presidente

[Handwritten signature]

06 - Noviembre - 2024
Fecha



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Fecha: 15/10/2024

Después de haber reunido la revisión final del trabajo de tesis a nivel doctorado, bajo el nombre: Relación del dióxido de carbono atmosférico y la densidad de arbolado en zonas urbanas.

Elaborado por: M.C. Jorge Damasco González Ortiz.

Los integrantes del comité están de acuerdo en que dicho trabajo satisface los requisitos para su publicación (indicándolo con una "X"), desde el punto de vista de:

Nombre	Firma	Contenido Técnico	Análisis de la Información	Formato (estilo y forma)
^{vocal} Dr. <u>Martín Martínez</u>  Asesor: <u>Salvador</u>  16969		X	X	X
Dr. <u>Andrés Fco Martínez</u>  91896 Rosales Representante área mayor		X	X	X
D. Ph. <u>Jesús Alejandro</u>  Representante área Menor <u>20389</u> ^{vocal} <u>Prieto Amparado</u>		X	X	X
Dr. <u>Guadalupe Nelson Aguilar</u>  Representante área <u>Palma 18</u> Estadística <u>11260</u> <u>-president</u>		X	X	X
Dra. <u>Rosalía Sánchez</u>  Representante área <u>Basvaldo</u>  Coordinación <u>16451</u> <u>-secretario</u>		X	X	X
Dr. <u>Laura Espino Enriquez</u>  Coordinador académico <u>2</u> Vo. Bo. <u>14405</u>		X	X	X

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

Periférico Francisco R. Almada km 1

C.P. 31453 Chihuahua, Chih.

Tel. 52 (614) 434-0363, 434-0304, 434-0458 fax 434-0345

www.fz.uach.mx

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el apoyo otorgado a través del Programa de Fondos Mixtos Chihuahua para el desarrollo de este estudio.

A la Facultad de Zootecnia y Ecología, de la Universidad Autónoma de Chihuahua por darme la oportunidad de continuar con mi preparación profesional.

Al comité de grado Dr. Martín Martínez Salvador, Dr. Andrés Fco. Martínez Rosales, D.Ph. Jesús Alejandro Prieto Amparán, Dr. Guadalupe Nelson Aguilar Palma y Dra. Rosalía Sánchez Basualdo por su asesoría y conducción de esta tesis.

DEDICATORIA

A mi esposa Blanca Imelda Aguilar Quezada por su firme y decidido apoyo en este proyecto que he emprendido.

A mis hijas Rayenary, Noly y Neyura y a mi hijo Jorge Pablo que ha sido la energía que alimenta mi alma para vencer todas las adversidades, gracias por su gran comprensión.

A mi padre Martin que se encuentra en el cielo guiando nuestros pasos y a mi madre Martha que me otorgaron la base firme para convertirme en una persona honesta y responsable, que me dieron las herramientas de perseverancia y dedicación para alcanzar las metas que me he propuesto.

A mis hermanos Ana María, Arturo, Armando, María Teresa, Martha Irene, Clara Margarita y Martin Osvaldo que me apoyaron en tantos momentos difíciles para salir adelante.

CURRICULUM VITAE

- 1985 – 1988 Estudios de Licenciatura en la Facultad de Ciencias Químicas, de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Obteniendo el Título de Ingeniero Químico Agroindustrial
- 1994 – 1996 Estudios de posgrado en la Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia y Ecología, División de Estudios de Posgrado, Obteniendo el Título de Maestro en Ciencias con Área Mayor en Recursos Naturales y Ecología.
- 1996 a 1997. Universidad Autónoma de Chihuahua, SEMARNAP y Gobierno de Estado Diplomado en Gestión Ambiental Facultad de Ciencias Químicas.
- 1996 a 1997. Universidad Autónoma de Chihuahua, SEMARNAP y Gobierno de Estado Diplomado en Control de la Contaminación. Facultad de Ciencias Químicas.
- Junio 7 al 14 noviembre 2005. Universidad Autónoma de Chihuahua, Diplomado en Docencia Centrada en el Aprendizaje. Dirección Académica.

2008 a 2011

Estudiante graduado del programa de Doctor in
Philosophia en la Universidad Autónoma de
Chihuahua, México con Área Mayor en Manejo
de Recursos Naturales.

RESUMEN GENERAL

RELACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO ATMOSFÉRICO Y LA DENSIDAD DE ARBOLADO EN ZONAS URBANAS

Por:

M.C. JORGE DAMASO GONZÁLEZ ORTIZ

Doctorado en Philosophia de Recursos Naturales

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Dr. Martín Martínez Salvador

Uno de los gases de efecto invernadero que se vincula con el calentamiento global y que se emiten grandes concentraciones en las zonas urbanas es el dióxido de carbono (CO_2). Se realizó un monitoreo de la concentración de CO_2 atmosférico y la temperatura para evaluar su relación con diferentes densidades de arbolado en la zona urbana de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. En una antena de 13 m de altura se colocó un sensor para medir la concentración de CO_2 y la temperatura atmosférica. La antena se instaló sobre el dosel y sobre el suelo en tres escenarios: Escenario 1 área con vegetación densa, escenario 2 con media vegetación y escenario 3 sin vegetación. La selección de los escenarios se realizó con un rango construido con valores del índice normalizado de vegetación conocido como NDVI. El monitoreo del gas se realizó durante 24 horas y por un periodo de 15 días para cada escenario. Se estimaron las medidas de dispersión y de tendencia central para los datos de CO_2 de cada escenario, posteriormente, se realizaron ajustes de modelos lineales polinómicos de orden 3 para cada escenario para predecir la concentración de CO_2 en ppm. Por otra parte, también se construyeron modelos lineales

polinómicos de orden 3 para predecir el comportamiento de la temperatura usando como variable independiente a las horas del día. Los modelos de regresión se evaluaron considerando los estadísticos r^2 , CMe, Fc, y las probabilidades de los parámetros evaluadas con la prueba de T de student. Considerando un $\alpha=0.05$ tanto para las pruebas de F de Fisher como para las pruebas de T de student. Los resultados mostraron ajustes aceptables en los modelos polinómicos tanto para la predicción de la concentración de CO₂ como para estimar la temperatura. Los modelos de concentración de CO₂ muestran que aproximadamente a las 15 horas se inicia un incremento en la concentración del gas, el cual continúa creciendo hasta las 7 a.m., cuando inicia un descenso que alcanza sus valores mínimos entre las 13 y 14 horas. Las concentraciones de CO₂ parecen ser mayores en las zonas desprovistas de vegetación y menores en las zonas con alta densidad de vegetación. Este comportamiento fue similar durante todo el periodo de 24 horas. La temperatura muestra una relación inversa con la concentración de CO₂, de tal manera que, al incrementar la temperatura, se observa una disminución en las concentraciones de CO₂ y viceversa. Los resultados sugieren que es importante mantener áreas arboladas en las zonas urbanas, las cuales se comportan como sumidero de CO₂ y potencializan la disminución del cambio climático.

GENERAL ABSTRACT

RELATIONSHIP OF ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND TREE DENSITY IN URBAN AREAS

By:

M.Sc. JORGE DAMASO GONZÁLEZ ORTIZ

One of the greenhouse gases linked to global warming and emitted in high concentrations in urban areas is carbon dioxide (CO₂). The atmospheric CO₂ concentration and temperature were monitored to evaluate this gas relationship according to different tree densities in the urban area of Chihuahua, Chihuahua City. A CO₂ sensor was placed on a 13 m high antenna to measure CO₂ concentration and atmospheric temperature. The antenna was placed 13 m above the canopy cover, and above the ground considering three scenarios: Scenario 1 was located in an area with dense vegetation, scenario 2 with medium vegetation, and scenario 3 without vegetation. The scenarios were selected using a normalized vegetation index (NDVI) by Landsat TM Images, which was divided into three scenarios according to vegetation vigor. Gas monitoring was carried out for 24 hours during 15 days per each scenario, data were logged each 15 minutes. Dispersion and central tendency measures were estimated for the CO₂ data of each scenario, subsequently, adjustments of order 3 polynomial linear models were made for each scenario to predict the CO₂ concentration. On the other hand, polynomial linear models of order 3 were also built to predict the behavior of temperature using the time (24 hours) as an independent variable. The regression models were evaluated according to the statistics r^2 , CMe, Fc, and the

probabilities of the parameters of the models, which were tested using a Student T test. Considering $\alpha=0.05$ for both Fisher's F tests and Student's T tests. Results showed acceptable fits in the polynomial models for both, CO₂ concentration predicting and temperature predicting. The CO₂ concentration models showed an increase in the concentration of the CO₂ gas, which begins at 15:00 hours, this behavior continues growing until about 7:00 a.m., when it begins a decrease that reaches the lowest values from 13:00 to 14:00 hr. CO₂ concentrations appear to be higher in areas devoid of vegetation and lower in areas with high density of vegetation. This behavior was similar throughout the 24 hours. Temperature shows an inverse relationship with CO₂ concentration, such that as temperature increases, CO₂ decreases and the other way around. The results suggest that it is important to maintain green areas in urban zones, which act as a CO₂ sink and help reduce climate change.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA	IV
CURRICULUM VITAE	V
RESUMEN GENERAL.....	VII
GENERAL ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	13
REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
Dióxido de carbono atmosférico.	15
Ciclo global del carbono.	16
Emisiones y almacenamiento de carbono.	17
La biomasa forestal.	18
Ecosistemas urbanos.	18
Estimaciones de biomasa en bosques.	19
Beneficios de la reducción de emisiones en bosques.	20
Mediciones de carbono.....	21
Almacenamiento de carbono en áreas urbanas.	23
Monitoreo del flujo de carbono.	23
La fotosíntesis y el carbono.	24
Relaciones del comportamiento del carbono por estaciones del año.	26
Captura de carbono en árboles urbanos.	27
Medición de dióxido de carbono atmosférico.....	27
Determinación de la biomasa aérea a través de NDVI.....	29
MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
ÁREA DE ESTUDIO.....	32
Sitios de muestreo.....	34
Adquisición de datos.....	38
Análisis estadístico.	41
Modelos para los escenarios de CO ₂	41
Modelos para los escenarios de temperatura.....	42
RESULTADOS.....	44
Comportamiento de la variable.....	44
Estadísticos básicos de las concentraciones de CO ₂ por escenario	50

Dispersión de los datos	58
Ajuste de modelos de regresión.	63
Análisis de regresión con el intercepto igual a Cero.	68
Tendencia de los modelos predictivos de CO ₂ en la zona urbana de Chihuahua.	73
Ajuste de modelos para graficar el comportamiento de la temperatura.....	77
Relaciones entre la temperatura y la concentración de CO ₂ atmosférico.	82
DISCUSIÓN.....	84
Análisis estadístico básico de las variables.	84
CONCLUSIONES	88
LITERATURA CITADA	89



INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han presentado eventos climáticos extremos que están ligados al fenómeno de cambio climático. Las áreas urbanas representan un factor potencial de contribución a este fenómeno con su diversidad de actividades y la quema de combustibles fósiles. El informe presentado en París por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), formado por más de 2,500 científicos de todo el mundo, manifestaron en febrero de 2007 la veracidad del cambio climático, inducido por el ser humano a través de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los aumentos en el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) desde la revolución industrial se considera responsable de aproximadamente el 60% del calentamiento global observado (Solomon *et al.*, 2007). De los 7 Pg (Pentágramos) de carbono liberado en promedio cada año a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles, la biosfera terrestre absorbe cerca de un tercio (Canadell *et al.*, 2007). Las áreas urbanas y metropolitanas que incluyen los recursos substanciales de la vegetación tienen la potencialidad de mejorar significativamente la calidad ambiental de las zonas urbanas y el bienestar de sus habitantes (Dwyer *et al.*, 2003). La vegetación urbana contribuye al control de la contaminación del aire, secuestro de dióxido de carbono atmosférico, beneficios hidrológicos, la conservación de energía, y mejora la estética urbana (McPherson *et al.*, 1994; McPherson, 2004).

El interés mundial sobre el cambio global de clima ha creado interés creciente en plantar árboles para ayudar a reducir el nivel de dióxido de carbono



atmosférico (Dwyer *et al.*, 1992). A medida que los bosques urbanos secuestran C y disminuyen la emisión de dióxido de carbono de áreas urbanas, los bosques urbanos pueden jugar un papel crítico en ayudar en el combate del aumento de los niveles de dióxido de carbono (Nowak y Crane, 2002). Los bosques urbanos, debido a su relativamente baja cobertura de árboles, típicamente almacenan menos C por hectárea (25.1 tC/ha) que el bosque permanente (53.5 tC/ha) (Nowak y Crane, 2002). Los árboles individuales urbanos no se cosechan por lo que su uso escénico permite que alcancen mayor longevidad y tamaño que en los bosques naturales, por lo que almacenan carbono por más periodo de tiempo (Nowak y Crane, 2002).

Las masas vegetales urbanas actualmente, en nuestra ciudad desarrollan un papel solamente como mejoramiento estético urbano, lo cual está limitado a la reforestación de especies caducifolias. Por lo tanto, es necesario investigar los beneficios en el control de la contaminación de aire, infiltración hidrológica, conservación de energía y captura de dióxido de carbono atmosférico.

El objetivo general del presente trabajo es analizar la relación entre las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico y el arbolado en zonas urbanas en la frontera del dosel en el estrato arbóreo, así mismo como objetivos específicos se determinará la variabilidad del CO₂ en el tiempo, se establecerá un modelo de regresión que prediga el comportamiento del CO₂ en las diferentes densidades arbóreas y se analizará la variación del dióxido de carbono debido a factores climáticos.



REVISIÓN DE LITERATURA

Dióxido de carbono atmosférico.

Bruhwiller y colaboradores, (2018) mencionaron que el carbono atmosférico en forma de dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) ayuda a regular el clima de la tierra al “atrapar” el calor en la atmósfera, también mencionan que la captura de energía se conoce como efecto invernadero. El CO_2 y el CH_4 , junto con otros gases de efecto invernadero (GEI) como el vapor de agua y el óxido nitroso (N_2O), mantienen el clima de la tierra en un rango habitable (Bruhwiller *et al.*, 2018). La producción y el consumo de carbón, petróleo y gas natural libera CO_2 , CH_4 y otros gases a la atmósfera. (Bruhwiller., 2018).

El panel intergubernamental de cambio climático 2007 estableció que el dióxido de carbono es uno de los principales gases de efecto invernadero (Hansen *et al.*, 2017), además, estos autores mostraron que el CO_2 tiene la capacidad de absorber radiación infrarroja y la mayor parte de este forzamiento, $2,0 \text{ W/m}^2$, se debe al CO_2 , y el CH_4 representa $0,5 \text{ W/m}^2$. El forzamiento radiactivo antropogénico global total en relación con el año 1750 fue de $2,8$ vatios por metro cuadrado W/m^2 (Myhre *et al.*, 2013).

Las observaciones atmosféricas sugieren que el forzamiento radiactivo antropogénico ha aumentado a $3,1 \text{ W/m}^2$, esto es, un 11 % adicional (Etminan *et al.*, 2016). La mayor parte de este forzamiento, $2,0 \text{ W/m}^2$, se debe al CO_2 , mientras que el CH_4 representa $0,5 \text{ W/m}^2$. La temperatura global en 2016 en relación con el promedio de 1880 a 1920 es mayor en $1,25 \text{ }^\circ\text{C}$ en respuesta a este aumento del forzamiento radiactivo (Hansen *et al.*, 2017).



Ciclo global del carbono.

El ciclo global del carbono está integrado por un ciclo rápido, con intercambios relativamente rápidos entre el océano, la biosfera terrestre y la atmósfera, y un ciclo lento, el cual involucra intercambios con reservorios geológicos como los suelos profundos, las profundidades oceánicas y las rocas (IPCC, 2013). El equilibrio entre la biosfera terrestre y el océano se produce en escalas de tiempo milenarias, mientras que la redistribución del CO₂ entre los reservorios geológicos requiere de decenas a cientos de miles de años o más.

Según las estimaciones del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), en la atmósfera había unos 830 Pg de carbono promedio de 2000 a 2009, mientras que en la biosfera terrestre se almacenan entre 450 y 650 Pg C. En los suelos existen reservorios de carbono más grandes (entre 1500 y 2400 Pg C) y las densidades de carbono orgánico del suelo (SOC) son más altas en las latitudes tropicales y boreales húmedas (IPCC, 2013). Scharlemann *et al.*, (2014) señalaron que estas cifras son inciertas debido a la profundidad limitada y la distribución dispersa de los perfiles de SOC muestreados u observados. Se estima que los suelos permafrost del Ártico contienen entre 1.339 y 1.580 Pg C en los 3 m superiores de la columna de suelo, y es posible que haya otros 400 Pg C en suelos profundos (Schuur *et al.*, 2015). Las aguas oceánicas y los sedimentos superficiales contienen alrededor de 40.500 Pg C. Los reservorios de “intercambio rápido” de la superficie del océano y la biota marina contienen solo 900 Pg C y 3 Pg C, respectivamente.



Emisiones y almacenamiento de carbono.

Las emisiones han aumentado alrededor de un 70% desde la década de 1980 hasta la década más reciente (2007 a 2016), mientras que la tierra y el océano han absorbido $3,0 \pm 0,8$ y $2,4 \pm 0,5$ Pg C por año, respectivamente (Le Quéré *et al.*, 2017).

Entre 1870 y 2017, los seres humanos emitieron 430 ± 20 Pg C como CO₂ a la atmósfera (Le Quéré *et al.*, 2018). Las emisiones globales de CO₂ provenientes de combustibles fósiles aumentaron a una tasa de aproximadamente el 4% anual desde 2000 hasta 2012.

América del Norte ha sido uno de los mayores productores mundiales de emisiones de CO₂ de origen humano. Entre 1850 y 2011, Estados Unidos ha añadido el 27% de las emisiones acumuladas, en comparación con el 25% de los países de la Unión Europea (UE) y el 11% de China, actualmente el mayor emisor del mundo (World Resources Institute *et al.*, 2014). En 2015, América del Norte emitió casi el 15% (1,5 Pg C) de los 9,9 Pg C emitidos a nivel mundial (Olivier *et al.*, 2016).

A nivel mundial, las estimaciones sugieren que durante la última década (2006 a 2015), el océano absorbió 2.4 ± 0.5 Pg C por año y la biosfera terrestre 3.0 ± 0.8 Pg C por año (Le Quéré *et al.*, 2017). De estos totales, se estima que la cantidad absorbida por la biosfera terrestre en América del Norte es de aproximadamente 0.47 Pg C por año (King *et al.*, 2015), o el 15 % de la absorción terrestre global.



La absorción de carbono por parte de las tierras de América del Norte está impulsada en gran medida por la regeneración y recuperación de los bosques a partir de cambios anteriores provocados por el hombre en la cobertura terrestre y el uso de la tierra, como la tala y la cosecha de bosques (King *et al.*, 2015), así como por aumentos en el área forestal a partir de prácticas mejoradas de manejo forestal (Melillo *et al.*, 2014).

La biomasa forestal.

Los bosques desempeñan un papel importante en la supervivencia y la vida de los seres vivos. Por ello, es gran utilidad conocer el grado de utilización y aprovechamiento de las zonas forestales (De Groot *et al.* 2019).

Ecosistemas urbanos.

Las ciudades están densamente pobladas y albergan grandes aglomeraciones de personas, las cuales, se ven afectados negativamente por la contaminación urbana (Gurjar *et al.*, 2008; Dasgupta *et al.*, 2013; Mourshed, 2011). Los esfuerzos para mejorar las condiciones de vida de las personas requieren una cobertura arbórea adicional en los centros urbanos para incrementar los servicios ecosistémicos ambientales, económicos y sociales (Bolund y Hunhammar, 1999; Gauthier, 2003; Naciones Unidas, 2016b). La cobertura arbórea urbana ofrece una variedad de servicios ecosistémicos, entre ellos: reducción de contaminantes del aire (Baró *et al.*, 2014; Jim y Chen, 2008); reducción de la escorrentía de aguas pluviales (Coutts *et al.*, 2013; Inkilainen *et al.*, 2013; Soares *et al.*, 2011); ahorro de energía en los edificios gracias a la



reducción de los costes de calefacción y refrigeración, y las emisiones de carbono evitadas asociadas gracias a la reducción del uso de energía (Akbari, 2002; Kulak *et al.*, 2013; Sawka *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016). La existencia de bosques urbanos también puede absorber CO₂ del aire a través del proceso de fotosíntesis, lo que puede contribuir a la mitigación del cambio climático (Devisscher *et al.* 2022; Mukhlison 2013). Los diferentes tipos de árboles tendrán diferentes capacidades para absorber CO₂ del aire (Conway y Vecht, 2015)

Estimaciones de biomasa en bosques.

Las estimaciones de biomasa y carbono para los bosques son particularmente necesarias, ya que los bosques tienen un alto contenido de biomasa y carbono, lo que influye en su papel en la mitigación de las emisiones de C (Bradshaw *et al.*, 1995; Brown *et al.*, 1996). Los cambios en la cubierta forestal, el uso y la gestión producen fuentes y sumideros de CO₂ que se intercambia con la atmósfera. Esto se debe a que entre el 49% y el 50% de la biomasa forestal seca es carbono (Munishi, 2001; Munishi y Shear, 2004).

Los análisis de captura de carbono en bosques sugieren que puede haber algunas oportunidades económicas y ecosistémicas en la reducción de las emisiones netas actuales de CO₂ a través de actividades de manejo forestal, ya que estos proyectos podrían tener beneficios ambientales adicionales a través de la protección de la diversidad biológica, la protección de las cuencas hidrográficas, entre otros (Houghton *et al.*, 1987).



Los cambios en el uso del suelo y las actividades de gestión forestal han sido históricamente y son actualmente fuentes netas de C (como gas CO₂) a la atmósfera (Brown *et al.* 1996). Sin embargo, la gestión forestal tiene un gran potencial para la mitigación de las emisiones de C al retirar C de la atmósfera y acumularlo en la biomasa vegetal y el suelo (Brown, 1997; Munishi *et al.*, 2000; Munishi, 2001; Munishi y Shear, 2004).

Determinar la cantidad de cambio en la biomasa vegetal puede ser importante para comprender el inventario global de C, incluido el destino del CO₂ producido por la quema de combustibles fósiles y por las industrias (Detwiler y Hall, 1988; Brown *et al.*, 1993) y la gestión de los depósitos existentes en la tierra para la mitigación de emisiones (Brown, 1999; Munishi *et al.*, 2000; Munishi y Shear, 2004).

Beneficios de la reducción de emisiones en bosques.

Los análisis realizados hasta la fecha sugieren que puede haber algunas oportunidades económicas para reducir las emisiones netas actuales de CO₂ a través de actividades de manejo forestal y que estos proyectos podrían tener beneficios ambientales adicionales a través de la protección de la diversidad biológica, la protección de las cuencas hidrográficas, entre otros (Houghton *et al.* 1987).

La gestión forestal puede ser probablemente importante para la mitigación de las emisiones de carbono y también puede utilizarse como base para el comercio de compensación de emisiones y los créditos de conservación. Estos créditos



pueden ser eficaces para recaudar fondos para la conservación (Daniel, 1995; Ronald, 1997; Casey, 1997).

Mediciones de carbono.

Las densidades de almacenamiento de carbono de árboles urbanos en su totalidad promedian $7.9 \text{ kg} * \text{m}^2$ de cobertura arbórea y las densidades de secuestro promedian $0,28 \text{ kg} * \text{m}^2$ de cobertura arbórea por año (Nowak, 1994). Por su parte, la biomasa sobre y bajo el suelo en todas las tierras forestales son de gran interés. Por ejemplo, en los Estados Unidos, incluyendo las masas forestales dentro de áreas urbanas, almacenaron aproximadamente 20,2 mil millones de toneladas de carbono en 2008 (Heath *et al.*, 2011).

Un método de medición de almacén de carbono en arboles a menudo implica el uso de datos de alta precisión obtenidos a partir del análisis de árboles estándar para construir indicadores ecológicos y ecuaciones de crecimiento de biomasa, la relación entre el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura del árbol y los indicadores de edad de los árboles se utilizan para desarrollar una ecuación de crecimiento alométrico para estimar la capacidad de secuestro de carbono de los bosques (Zhang *et al.*, 2019). Posteriormente, el método de estimación de modelos, basado en un inventario de parcelas, es un enfoque conveniente y preciso adecuado para cuantificar el secuestro de carbono de los espacios verdes urbanos en grandes áreas o regiones urbanas.



En la actualidad, los sistemas ampliamente utilizados incluyen Citygreen, NTBC (National Tree Benefit Calculator), Pathfinder y I-Tree Eco. Estos modelos reciben una amplia aplicación en la evaluación de los beneficios ecológicos de los espacios verdes urbanos. Por ejemplo, el sistema de cálculo Citygreen, junto con estudios in situ, se ha empleado para estimar el secuestro total de carbono de los espacios verdes en ciudades como Shenzhen (Chen *et al.*, 2009), Shanghai (Xu, 2010) y Shenyang (Liu *et al.*, 2008), y la cuantificación de los beneficios del secuestro de carbono de las plantas de los espacios verdes en el área residencial de Nanjing utilizando NTBC (Li Q. *et al.*, 2023). El módulo I-Tree Eco se ha utilizado en ciudades del Reino Unido (Monteiro *et al.*, 2019), Estados Unidos (Ning *et al.*, 2016), Tailandia (Intasen *et al.*, 2017) y Hungría (Kiss *et al.*, 2015) para evaluar el valor ecológico de los espacios verdes urbanos.

Las evaluaciones basadas en sensores de la productividad neta de los ecosistemas (NEP) se aplican ampliamente en los estudios de sumideros de carbono a escala regional y urbana, como algunos estudios que utilizaron plataformas como el QuickBird, RS y SIG para estimar la absorción anual de CO₂ por árbol en Los Ángeles (Mcpherson *et al.*, 2008), y combinaron LiDAR con QuickBird para estimar las reservas de carbono en los árboles urbanos (Schreyer *et al.*, 2014). Mientras tanto, existen estudios sobre el uso de modelos explícitos de cálculo de reservas de carbono forestal basados en sensores remotos para realizar un mapeo de alta resolución de las reservas de carbono forestal a gran escala y un monitoreo dinámico de los sumideros de carbono forestal a nivel mundial (Zhu *et al.*, 2024), así como la combinación de mediciones terrestres y



datos LiDAR para estimar las reservas de carbono de los árboles urbanos (Gülin y Bosch, 2021).

Almacenamiento de carbono en áreas urbanas.

La investigación sobre el almacenamiento de carbono en la superficie de los espacios verdes urbanos en Auckland también utilizó datos de LiDAR combinados con estudios de campo, lo que sugiere que este enfoque no solo proporcionó datos más precisos, sino que también redujo la frecuencia y el costo de las mediciones reales (Wang *et al.*, 2020), así mismo ofrecer información detallada sobre la biomasa vegetal en áreas urbanas complejas (Alonzo *et al.*, 2014). Sin embargo, debido a la heterogeneidad espacial y la dinámica temporal de los espacios verdes urbanos, el uso de métodos de estimación RS para estimar el almacenamiento de carbono puede enfrentar desafíos como la incapacidad de determinar con precisión la cantidad de plantas y las dificultades para separar los límites superpuestos de la cubierta arbórea (Richardson y Moskal, 2014).

Monitoreo del flujo de carbono.

El método micro meteorológico se basa en el monitoreo del microclima e implica un monitoreo dinámico continuo de las condiciones del flujo atmosférico cerca de la superficie y de las concentraciones atmosféricas de CO₂. Este enfoque estima indirectamente el flujo de carbono de la vegetación (Liu *et al.*, 2018). Se centra en el estudio cuantitativo del intercambio de dióxido de carbono y agua entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres (Grimmond *et al.*, 2002).



En Phoenix, se adoptó el método micro meteorológico, revelando que las concentraciones de CO₂ al mediodía eran más bajas que antes del amanecer debido principalmente a la fuerte luz solar que promueve la fotosíntesis en la vegetación (Idso *et al.*, 1998), mientras que en Essen utilizaron la medición móvil, se demostró que las concentraciones de CO₂ en la ciudad eran más bajas en los meses de verano debido a la fotosíntesis de la vegetación y otros efectos (Henninger y Kuttler, 2010).

El método micrometeorológico puede estimar con precisión los flujos de carbono a escala regional, siendo el método Eddy covarianza más comúnmente utilizado. Velasco *et al.* (2005) utilizaron el método Eddy covarianza para demostrar que las concentraciones de CO₂ urbano son más bajas durante el día durante la temporada de crecimiento de las plantas, debido principalmente a la alta capacidad fotosintética de las plantas en esta época del año (Velasco y Roth, 2010), a similar conclusión llegaron Rana *et al.* (2021).

Aunque el método micrometeorológico permite realizar observaciones in situ continuas, la atmósfera inestable cerca de la superficie y las condiciones topográficas replicadas pueden introducir errores significativos en los resultados (Wilson *et al.*, 2002).

La fotosíntesis y el carbono.

Las mediciones de las tasas de fotosíntesis de las especies de campo de Wisconsin en la década de 1990 fueron una aplicación temprana del uso de PPS para medir las tasas fotosintéticas netas de las plantas (Reich *et al.*, 1995). A



finales del siglo XX, algunos estudios informaron la adopción de un medidor de fotosíntesis para cuantificar la intensidad fotosintética de las plantas en un espacio verde urbano representativo en Guangzhou y estimaron la absorción de CO₂ de las plantas a través de la ecuación de reacción del proceso de fotosíntesis (Yang, 1996).

Utilizando analizadores de gas infrarrojos, se realizó la medición de la absorción anual de dióxido de carbono por las plantas urbanas en Corea (Dong, et.,al 2024), Además, Han, (2005) propuso un método para calcular el secuestro de carbono y la liberación de oxígeno de las plantas utilizando la fórmula de tasa de asimilación neta. El experimento del método de asimilación requiere solo una pequeña cantidad de hojas de plantas, lo que lo hace amigable para las plantas y ampliamente aplicable, y se ha empleado en estudios sobre plantas en lugares como Bengala Occidental (Biswas *et al.*, 2014), Roma (Gratani *et al.*, 2016) y Fuzhou (Wang, 2010).

El método de asimilación mide directamente la capacidad de secuestro de carbono de una sola planta, y los resultados son precisos, lo que permite una comparación directa de los beneficios del secuestro de carbono entre diferentes plantas (Dong *et al* 2024).

La razón principal detrás de estas fluctuaciones es la estrecha relación entre las tasas fotosintéticas y las condiciones ambientales fisiológicas y ecológicas, como la temperatura atmosférica, la humedad relativa y la radiación solar (Evans y Santiago, 2011).



Relaciones del comportamiento del carbono por estaciones del año.

Aunque el invierno exhibe una capacidad de fijación de carbono relativamente más débil durante todo el año, el método sigue siendo de alta eficiencia (Weissert *et al.*, 2017), el aire con mayor humedad relativa mejora la conductividad estomática en las hojas de las plantas, lo que eleva la tasa de fotosíntesis (Wang *et al.*, 2019). Además, no existe una manera directa de cuantificar los sumideros de carbono en los espacios verdes urbanos, y los estudios existentes sobre el sumidero de carbono emplea metodologías desarrolladas para los sumideros de carbono zonas forestales (Gratani *et al.*, 2016). Este marcado contraste con los espacios verdes desarrollados naturalmente implica que el sumidero de carbono en los espacios verdes urbanos es más complejo (Zhao *et al.*, 2023). Por lo tanto, los métodos existentes para medir el secuestro de carbono en los espacios verdes pueden no ser totalmente aplicables a los entornos urbanos. (Kim, *et al.*, 2024)

Se han llevado a cabo exploraciones en métodos no destructivos, como el método de la biomasa, para estudiar el secuestro de carbono en los espacios verdes de los parques de Bangkok (Singkran, 2022), y el uso de la teledetección para cuantificar y mapear la estructura forestal para estimar la biomasa forestal sobre el suelo para cuantificar las reservas y los flujos de carbono en los bosques tropicales (Mohd Zaki y Abd Latif, 2017).



Captura de carbono en árboles urbanos.

Los diferentes tipos de árboles tendrán diferentes capacidades para absorber CO₂ del aire. Por lo tanto, la selección de especies que cumplan con los criterios para seleccionar tipos de bosques urbanos (Conway y Vecht 2015; Morakinyo *et al.* 2020; Sun *et al.* 2022; Wu *et al.* 2021). Las densidades de almacenamiento de carbono de árboles urbanos en su totalidad promedian 7,69 kg C m⁻² de cobertura arbórea y las densidades de secuestro promedian 0,28 kg C m⁻² de cobertura arbórea por año (Nowak, 1994).

Actualmente las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico son monitoreadas continuamente por la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos, en su observatorio de Mauna Loa, Hawaii. Reportando que cada año las concentraciones se han ido elevando con una tasa de 0.11 ppm/año (NOAA, 2024)

Las concentraciones toman diferentes valores en forma cíclica en función de las estaciones de verano e invierno, variando en el invierno 2008 - 2009 desde 384 ppm hasta 388 ppm en primavera verano de 2009 (NOAA, 2009).

Medición de dióxido de carbono atmosférico.

Los métodos de mediciones directas en sitios incluyen mediciones de laboratorio y muestreo de campo del carbón total en el suelo y la biomasa. Los cambios en el contenido de carbón resultan de cambios en la mejora del suelo puede entonces ser expresados como el cambio en el carbón acumulado con



base en una área o volumen. El cálculo no es difícil, pero requiere del conocimiento de la variabilidad de las propiedades de suelo.

Un método directo y prometedor es la medición del flujo de dióxido de carbono con el método Eddy covarianza. Esta técnica es una de las herramientas más usadas para la cuantificación del balance anual de carbono en un ecosistema (Baldocchi, *et al.*, 2001). El componente vertical de movimientos de aire sobre una superficie con vegetación, puede medirse conjuntamente con la concentración de carbón asociadas con cada turbulencia. Correlacionando la velocidad de viento vertical y la concentración de dióxido de carbón para cada movimiento turbulento ascendente y descendente, el flujo neto de dióxido de carbón puede ser calculado para cada ecosistema. La exactitud y precisión del método Eddy covarianza se ha perfeccionado con más experiencias y está siendo usado en 150 localidades en el mundo los cuales están integrados a la red internacional Fluxnet en donde están asociados numerosos investigadores de todo el mundo que trabajan en el análisis de flujos de dióxido de carbono (Baldocchi, *et al.*, 2003).

Las mediciones directas de emisiones de dióxido de carbono que incluyen todas las fuentes de emisiones en áreas urbanas son necesarias para mejorar el entendimiento del papel que juegan las ciudades en el cambio global; en particular las megas ciudades de países en desarrollo. Velasco *et al.*, (2005) midieron con el método de Eddy covarianza el flujo de dióxido de carbono en dos distritos de la ciudad de México. Estas mediciones consideraron todas las fuentes emisoras de dióxido de carbono y las fuentes iguales bajo cubierta del dosel



urbano. Los flujos de un barrio densamente poblado se colectaron durante abril 2003, y los flujos de un distrito ocupado se colectaron recientemente en marzo 2006. Las mediciones del 2003 mostraron que la superficie urbana es una fuente neta de dióxido de carbono. Las mediciones del flujo de dióxido de carbono mostraron un claro patrón diurno, con las emisiones más altas durante la mañana (1.60 mg m⁻²s⁻¹), y las emisiones bajas durante la noche. La media del flujo diario es 0.41 mg m⁻² s⁻¹, que es similar a lo observado en ciudades de Europa y Estados Unidos (Velasco *et al.*, 2005).

Hasta ahora, el principal enfoque de mediciones de dióxido de carbono en espacios urbanos es necesariamente monitoreando el dióxido de carbono en la capa límite urbana, arriba del nivel de piso del sitio de medición (Aikawa *et al.*, 1993; Nasrallah *et al.*, 2003).

Determinación de la biomasa aérea a través de NDVI

El índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) es un parámetro biofísico general que correlaciona la actividad fotosintética de la vegetación y el reflejo del grado de color verde de la vegetación relacionó con la abundancia de clorofila y absorción de energía (Tucker, 1979; Myneni *et al.*, 1995). Esto permite una comparación razonable de los cambios estacionales e interanuales en la actividad y crecimiento de vegetación, lo que ha permitido monitorear la actividad fotosintética (Huete *et al.*, 2002).

La distribución de la cobertura de diferente vegetación, globalmente y continentalmente se han investigado en mucho estudio de satélite con datos



derivados y mediciones de campo (Defries *et al.*, 1998; Hansen *et al.*, 2000). Especialmente, el MODIS usa todos los mapas de cobertura de suelo disponibles, espectral, temporal, direccional e informe espacial de otros datos obtenidos de MODIS (Friedl *et al.*, 2002). El mapa de cobertura de suelo ha sido muy importante para investigaciones a escala continental o global del clima y biogeoquímicos del sistema de la tierra, por lo tanto, el NDVI (Índice de vegetación diferencial normalizada) y LAI pueden ser parámetros importantes para obtener los mapas de cobertura de Suelo de la tierra (p. ej. Defries and Townshend, 1994; Myneni *et al.*, 2002; Lotsch *et al.*, 2003).

Un ejemplo del uso de NDVI son los estudios realizados en áreas extensas del Sahel en donde se caracterizaron la relación entre la productividad de vegetación y precipitación, mediante el uso del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) (Malo & Nicholson de 1990, Milich & Weiss 2000, Li *et al.*, 2001). El NDVI, es calculado como la tasa del infrarrojo cercano en respuesta al rojo espectral que ha sido bien establecido en la literatura (Justice *et al.*, 1985, Reed *et al.*, 1994), para representar el crecimiento y vigor de la vegetación en la superficie terrestre. NDVI se calcula con la radiación solar reflejada de longitudes de onda en el infrarrojo cercano (NIR) y visible (VIS), usando el algoritmo siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS})$$

NDVI es una función no lineal que varía entre - 1 y 1 (indefinido cuando NIR y VIS son cero). Los Valores de NDVI para la vegetación terrestre generalmente



oscilan arriba de 0.1 a 0.7, valores mayores de 0.5 indican una vegetación densa (Ruldina *et al.*, 2012).



MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO.

El estudio se llevó a cabo en la ciudad Deportiva del Valle de Chihuahua localizado en la ciudad de Chihuahua en las coordenadas 28°38'22.11" N; 106° 04'21.74", el cual tiene una superficie de 294.15 km² y una población de 809,232 habitantes. El valle está localizado en un relieve de lomeríos bajos y flanqueados por cordones montañosos en los que destaca la Sierra de Nombre de Dios en la colindancia este, Cerro Grande y Santa Rosa en el lado sur y Sierra Azul en el lado oeste. A través del valle serpentean los ríos Chuvíscar que desemboca en el río Sacramento (Figura 1)

El clima que predomina en la zona es semiárido extremo, con una temperatura promedio anual de 18.6 °C. Presentándose las temperaturas más altas en los meses de mayo, junio, julio y agosto, cuyo intervalo está representado por los valores de 30.5 a 33.5 °C, mientras que las más bajas se registran en los meses de diciembre, enero y febrero, variando de 2.1 a 3 °C. La humedad relativa en el ambiente oscila en 45% anual. En cuanto a la precipitación al año se presentan un promedio de 71 días con lluvia, con una precipitación promedio anual de 336.8 mm.



Figura 1.- Localización del área de estudio en el Valle de Chihuahua Cd.

Deportiva



Sitios de muestreo.

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) como herramienta utilizada para estimar la biomasa y el estado de la vegetación suele considerar algunos supuestos, los cuales fueron utilizados para identificar las zonas con diferente grado de densidad de copa para este estudio en la ciudad de Chihuahua. Las áreas preseleccionadas para el NDVI fueron evaluadas de acuerdo a los siguientes supuestos que se vinculan con el buen uso del índice para clasificar áreas con diferente porcentaje de cobertura: Se asume que existe una relación lineal o casi lineal entre los valores del NDVI y la cantidad de biomasa presente. A medida que aumenta la biomasa, el NDVI también tiende a aumentar. Se supone que el área de estudio tiene un tipo de vegetación homogéneo, lo que facilita la interpretación de los valores del NDVI en términos de biomasa, además, se considera que las condiciones de iluminación son constantes y que no hay interferencias significativas de las condiciones atmosféricas que puedan afectar las mediciones.

Por otra parte, se considera que el estrés hídrico u otros factores estresantes (como plagas o enfermedades) no están afectando significativamente la biomasa durante el período de evaluación. Se supone que el NDVI mide principalmente la biomasa de la vegetación y no está influenciado por la cobertura del suelo (como rocas o suelo desnudo) de manera significativa. Se considera que las imágenes de satélite o las mediciones del NDVI se obtienen en momentos representativos del ciclo de crecimiento de la vegetación. El área



de la Deportiva y las zonas en las que se aplicó el NDVI cumplieron con los supuestos anteriormente descritos.

Para determinar los puntos de muestreo de dióxido de carbono, primeramente, se obtuvo el índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI), para la ciudad de Chihuahua, para lo cual se contó con las imágenes corresponde al sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5 y el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus del satélite Landsat 7. Las escenas completas abarcan una superficie de 185Km. x 185 Km. proporcionando información en varias bandas: 3 en el espectro visible (rojo, verde, azul) y 2 en el infrarrojo (medio y cercano), con una resolución de píxel de 30 metros, 2 en el térmico con una resolución de 60 metros y una imagen pancromática con resolución 15 metros. Se utilizaron las imágenes del día 10 de octubre del 2009 procesándolas mediante el software IdrisiTM. Una vez obtenido los índices de vegetación diferencial normalizada de la ciudad Deportiva (Figura 3), que representa la abundancia de cobertura vegetal urbana se procedió a seleccionar los rangos de análisis, tomando en cuenta tres escenarios de vegetación que se establecen de la siguiente forma: ESCENARIO UNO: de 0.2783 a 0.6078 NDVI estrato A (vegetación densa), ESCENARIO DOS: de 0.0217 a 0.2745 NDVI estrato B (Vegetación media) y ESCENARIO TRES: de 0.0759 a 0.0259 NDVI estrato C (Sin vegetación). Se estableció un sitio de muestreo en cada estrato, en cada sitio se midió la concentración de dióxido de carbono.

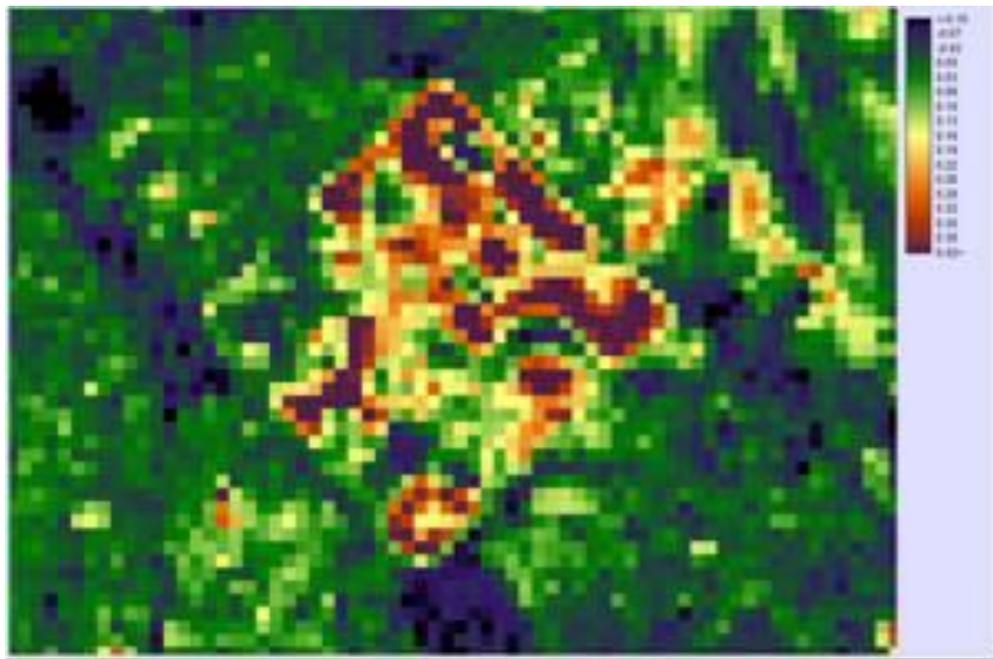


Figura 2- Mapa del Índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI)
Ciudad Deportiva



Figura 3.- Sitios de muestreo en la Ciudad Deportiva



El muestreo se realizó después de la época de lluvias (del 3 de agosto al 8 de noviembre 2011), ya que en este periodo se presenta el máximo el crecimiento vegetativo, por lo que hipotéticamente debe haber mayor sumidero de CO₂, considerando el levantamiento de las variables durante quince días para cada sitio en intervalos de 30 minutos y 15 minutos, con horario de 24 horas de las 00:00:00 a las 23:59:00.

Adquisición de datos

Las mediciones de concentración de dióxido de carbono se hicieron con un equipo Carbón dióxido probe (diffusion) marca Vaisala modelo GMP343 que utiliza el método de absorción infrarroja, así mismo se calibro para registra los datos cada 30 minutos.

Las mediciones se realizaron a una altura de 12 m tomando en cuenta la altura arbórea del sitio seleccionado. Para lo cual se habilitó una unidad móvil con torre telescópica en donde se montó el sensor de medición, colocándolo en el límite superior del dosel arbóreo (Figura 4). Una vez terminado el periodo de medición se procedió extraer los datos adquiridos por el sensor mediante el software M170 Vaisala.

Una vez integrada la base de datos se procedió a analizar la continuidad del monitoreo, para lo cual se tomó en cuenta el día de muestreo, hora y valor de la concentración, esto con la finalidad de estandarizar los datos que serán utilizados en el análisis estadístico y eliminar los datos que se encuentran registrados en



periodos menores a una semana continúa debido a la interrupción del suministro de energía eléctrica.



Figura 4. Equipo de medición de concentraciones de Dióxido de carbono



Análisis estadístico.

Para identificar el modelo para explicar el comportamiento de las concentraciones de CO₂ se realizaron gráficas de dispersión de los datos observados. La dispersión de los datos mostró una tendencia polinomial con dos puntos de inflexión. Se observó que la concentración de carbono mostró crecimiento durante la madrugada alcanzando un punto de inflexión en la mañana, posteriormente, mostró una tendencia decreciente mostrando otro punto de inflexión por la tarde, después de mediodía. Este comportamiento sugiere una curva sigmoideal. Por esta razón se decidió ajustar un modelo polinómico de orden 3. Este análisis se realizó exclusivamente para modelar el comportamiento de los datos en el periodo de evaluación. Se realizó una evaluación de la dispersión de los datos de CO₂ y temperatura para conocer su tipo de dispersión.

Se estimaron estadísticos básicos de dispersión y de tendencia central para cada conjunto de datos, tanto de CO₂ como de temperatura para cada uno de los tres escenarios estudiados.

Se realizaron ajustes de modelos de regresión para predecir las variables CO₂ y Temperatura en función de la Hora del Día, para lo cual se consideraron los siguientes modelos lineales de orden 3.

Modelos para los escenarios de CO₂.

Escenario 1. Sobre alta densidad de dosel



$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 * hora + \beta_2 * hora^2 + \beta_3 * hora^3 + \varepsilon$$

Donde: γ = Concentración de CO₂ en ppm. B son los valores de los parámetros, hora corresponde a la variable predictora, y ε corresponde al error experimental.

Escenario 2. Sobre media densidad de dosel

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 * hora + \beta_2 * hora^2 + \beta_3 * hora^3 + \varepsilon$$

Donde: γ = Concentración de CO₂ en ppm. B son los valores de los parámetros, hora corresponde a la variable predictora, y ε corresponde al error experimental.

Escenario 3. Al aire libre

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 * hora + \beta_2 * hora^2 + \beta_3 * hora^3 + \varepsilon$$

Donde: γ = Concentración de CO₂ en ppm. B son los valores de los parámetros, hora corresponde a la variable predictora, y ε corresponde al error experimental.

Modelos para los escenarios de temperatura.

Los modelos para los escenarios de temperatura tienen la misma forma que los modelos para los escenarios de CO₂.

Hipótesis de los modelos:

El juego de hipótesis para todos los modelos fue el siguiente:

Ho: Los parámetros de los modelos son igual a cero



Ha: Al menos un parámetro es diferente de cero

Los estadísticos utilizados para la selección del mejor modelo fueron:

R^2 , Prueba de F para cada modelo, Pruebas de T de student para los parámetros de los modelos. Las pruebas se corrieron con un nivel de significancia $\alpha=0.05$.



RESULTADOS

Comportamiento de la variable.

Se analizó el comportamiento diario de la variable concentración de dióxido de carbono atmosférico en los tres escenarios estudiados. En la 1 se observa que el comportamiento en un lapso de 24 horas para el escenario 1 la concentración máxima fue de 358.1 ppm y una mínima de 319.6 ppm con una media de 337.06 ± 9.03 , en donde también se observar que existe un decremento de la concentración en un periodo de las 9:55:03 AM a las 7:55:03 PM (Figura 5). Para el escenario 2 el comportamiento de la concentración en un lapso de 24 horas fue de un máxima de 381.5 ppm y una mínima de 328.67 ppm con una media de 344.95 ± 12.15 , mientras que en este escenario se observó un comportamiento descendente en el periodo de las 11:50:21 AM a las 18:50:21 PM (Figura 6. En el escenario 3 las concentraciones máximas de dióxido de carbono fueron de 377.25 ppm y mínima de 326.75 ppm con una media de $345.63 \text{ ppm} \pm 15.74$. Este escenario fue aparentemente diferente a los periodos de los escenarios 1 y 2, ya que en un lapso de 14 horas las concentraciones tienen cambios con una diferencia de ± 4.5 ppm y con un comportamiento más homogéneo (Figura 7).

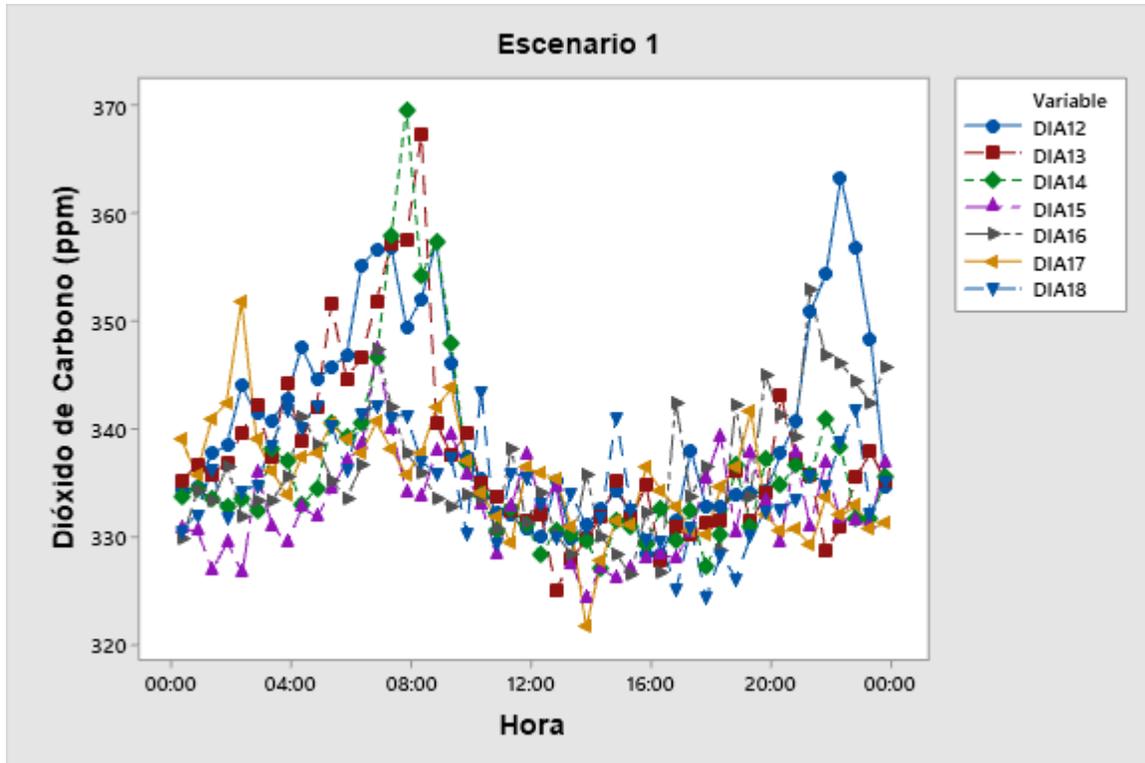


Figura 5.- Serie de tiempo de la concentración de dióxido de carbono en sitio con cobertura vegetal alta

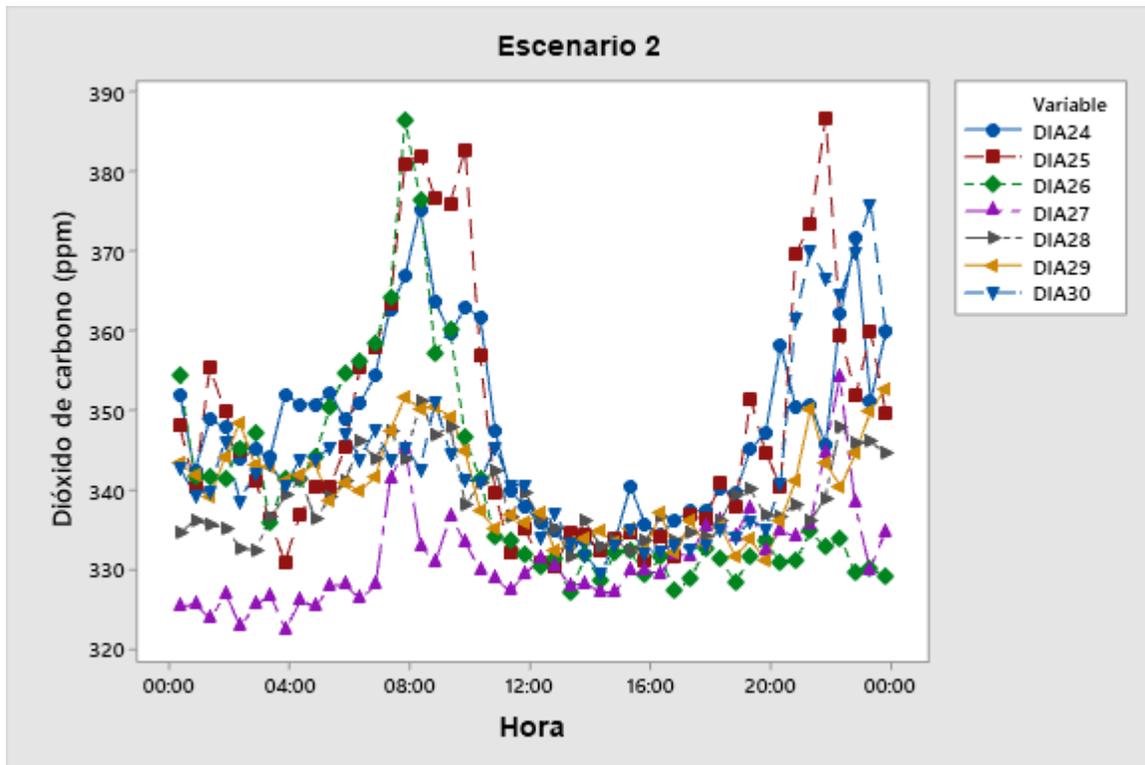


Figura 6.- Serie de tiempo de la concentración de dióxido de carbono en sitio con cobertura vegetal media

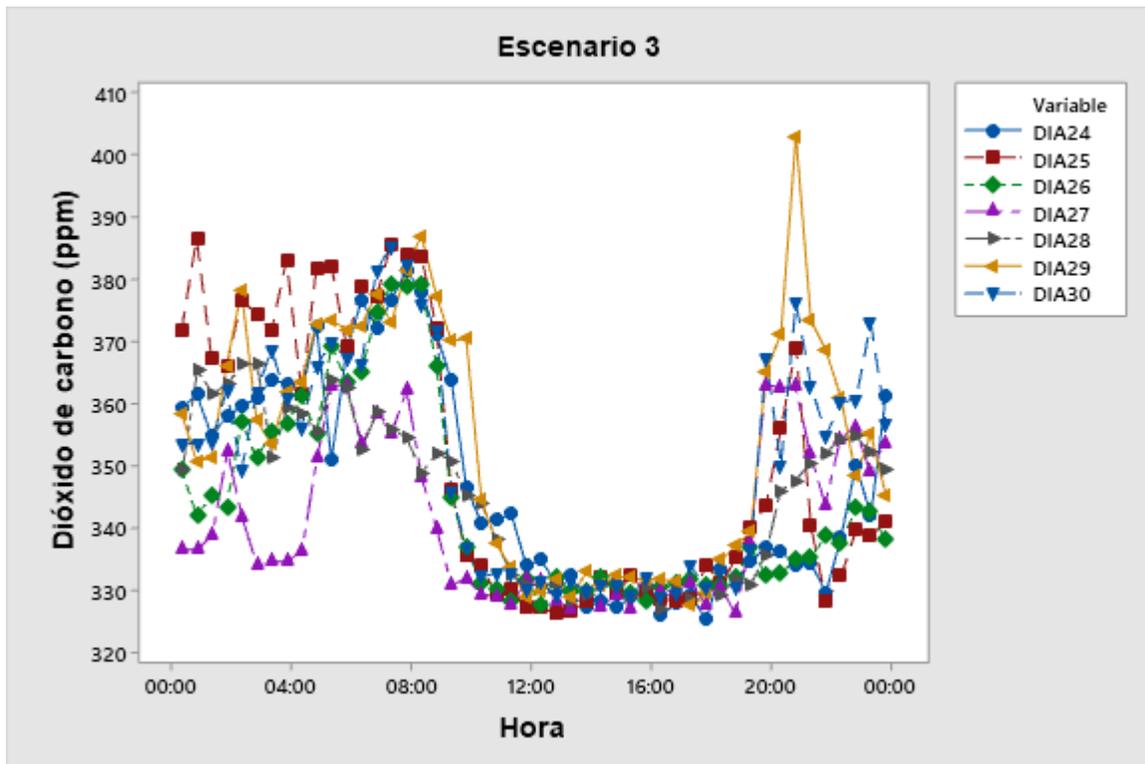


Figura 7. Serie de tiempo de la concentración de dióxido de carbono en sitio sin cobertura vegetal



En el análisis semanal de los tres escenarios el promedio de la concentración de dióxido de carbono tuvo valores de 334.68 ppm para el sitio con cobertura vegetal alta, 343.87 ppm para el sitio con cobertura vegetal media y para el sitio sin cobertura vegetal fue de 345.53 ppm. De lo anterior se concluye que los sitios con coberturas de vegetación alta influyen negativamente en la concentración de dióxido de carbono atmosférico ya que en su ciclo diurno regularmente las concentraciones disminuyen y contrariamente en los sitios sin cobertura vegetal las concentraciones regularmente son más altas comparadas con las coberturas de vegetación altas y medias (Figura 8).

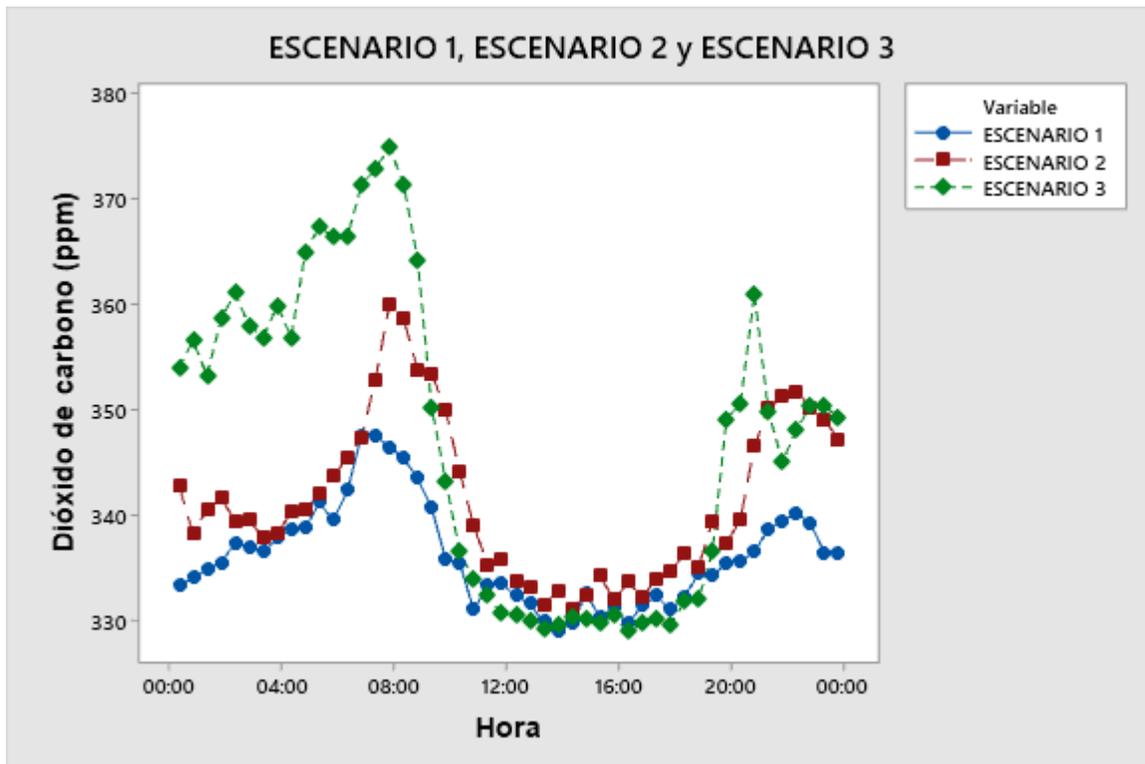


Figura 8.- Concentración de dióxido de carbono por sitio semanal



Estadísticos básicos de las concentraciones de CO₂ por escenario

EL cuadro 1 muestra las estadísticas básicas de las emisiones de CO₂ en el área de estudio considerando tres escenarios con diferente densidad de vegetación. El escenario 1 corresponde a la zona con alta densidad de copa de arbolado, el escenario dos corresponde a el área con media densidad de copa y el escenario 3 corresponde a un área abierta, libre de vegetación.

Los valores medios en la concentración de CO₂ en partes por millón en la atmosfera fue de 335.82, 345.15 y 347.46 para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente. Con base en el rango, se observa que la concentración mayor se presentó en el escenario 2 con 399 ppm, mientras que la menor concentración se presentó en el escenario 1 con 323.90 ppm de CO₂ atmosférico.

Los estadísticos muestran semejanzas en los valores medios y de dispersión de la concentración de CO₂ para los tres escenarios estudiados. Adelante se presentan los resultados de los modelos ajustados para cada escenario.

Los datos de concentración de CO₂ en los tres escenarios estudiados presentaron distribución normal. El cuadro 2 muestra los parámetros de Media y Sigma de las poblaciones para cada uno de los escenarios.

El Cuadro 3 muestra los resultados de las pruebas de normalidad para cada escenario estudiado, estas pruebas se realizaron con un $\alpha = 0.05$. Para cada modelo se presentan los resultados de 3 pruebas de normalidad. En todos los casos se obtuvieron valores $\alpha < 0.05$, por lo que se concluye que los datos de



concentración de CO₂ atmosférico en los 3 escenarios estudiados presentan distribución normal.

Las Figuras 9, 10, 11 muestran la distribución de frecuencias de los valores originales de las concentraciones de CO₂ colectadas para cada uno de los escenarios. Así mismo presentan las curvas de normalidad, las cuales se construyeron con base en los parámetros media y desviación estándar para cada uno de los escenarios estudiados.

El comportamiento de las frecuencias de cada uno de los escenarios estudiados muestra diferentes patrones de distribución entre escenarios; sin embargo, en todos se observa una tendencia de distribución normal, la cual ya ha sido corroborada con las pruebas correspondientes.



Cuadro 1. Estadísticas básicas de la concentración de CO₂ en la ciudad de Chihuahua.

Estadístico	<i>NDVI1</i>	<i>NDVI2</i>	<i>NDVI3</i>
Media	335.82	345.15	347.46
Error típico	0.51	1.09	1.37
Mediana	334.60	344.05	342.10
Moda	336.30	332.10	332.00
Desviación estándar	7.12	13.05	17.72
Varianza de la muestra	50.74	170.17	314.07
Curtosis	2.42	3.00	-1.07
Coefficiente de asimetría	1.30	1.42	0.53
Rango	40.50	72.20	61.00
Mínimo	323.90	327.70	325.90
Máximo	364.40	399.90	386.90
Suma	64477.40	49701.70	58373.00
Cuenta	192.00	144.00	168.00



Cuadro 2. Parámetros de distribución normal para los tres escenarios de concentración de CO₂ en Chihuahua.

Escenario	Parámetros de distribución	
	Mu	Sigma
NDVI1	335.8198	7.123549
NDVI2	345.1507	13.04505
NDVI3	347.4583	17.72205



Cuadro 3. Pruebas de bondad de ajuste de normalidad para los datos de tres escenarios de concentración de CO₂ en Chihuahua.

ESCENARIO	Test	Estadístico	p valor
NDVI1	Kolmogorov-Smirnov	D 0.1067362	Pr > D <0.010
	Cramer-von Mises	W-Sq 0.5358649	Pr > W-Sq <0.005
	Anderson-Darling	A-Sq 3.5272176	Pr > A-Sq <0.005
NDVI2	Kolmogorov-Smirnov	D 0.0941106	Pr > D <0.010
	Cramer-von Mises	W-Sq 0.3831066	Pr > W-Sq <0.005
	Anderson-Darling	A-Sq 3.1332674	Pr > A-Sq <0.005
NDVI3	Kolmogorov-Smirnov	D 0.1637293	Pr > D <0.010
	Cramer-von Mises	W-Sq 1.0385093	Pr > W-Sq <0.005
	Anderson-Darling	A-Sq 6.3437219	Pr > A-Sq <0.005

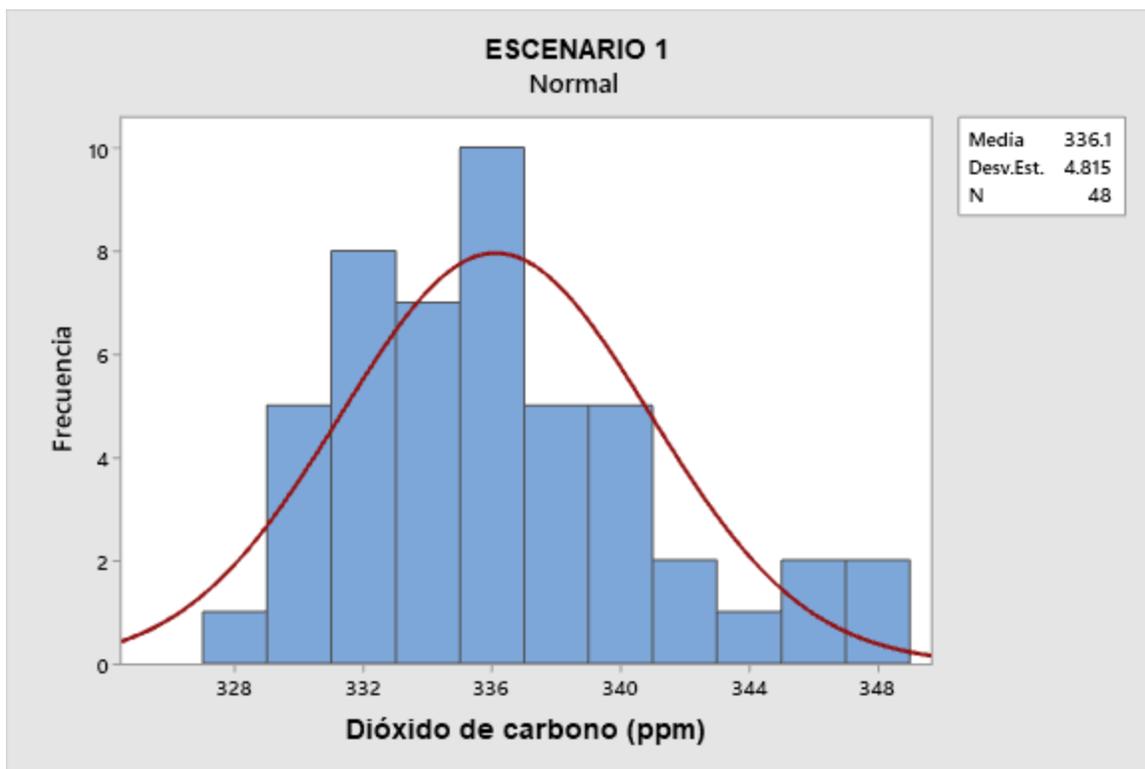


Figura 9 Grafica de normalidad escenario 1

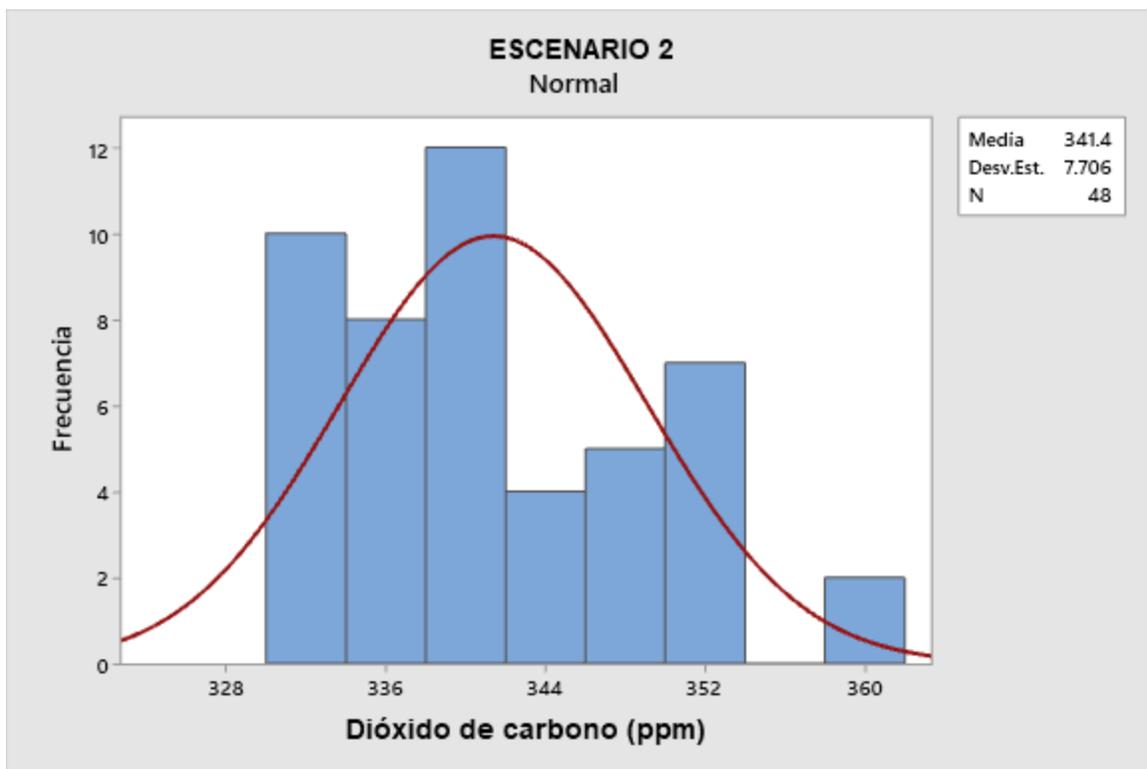


Figura 10 Grafica de normalidad escenario 2

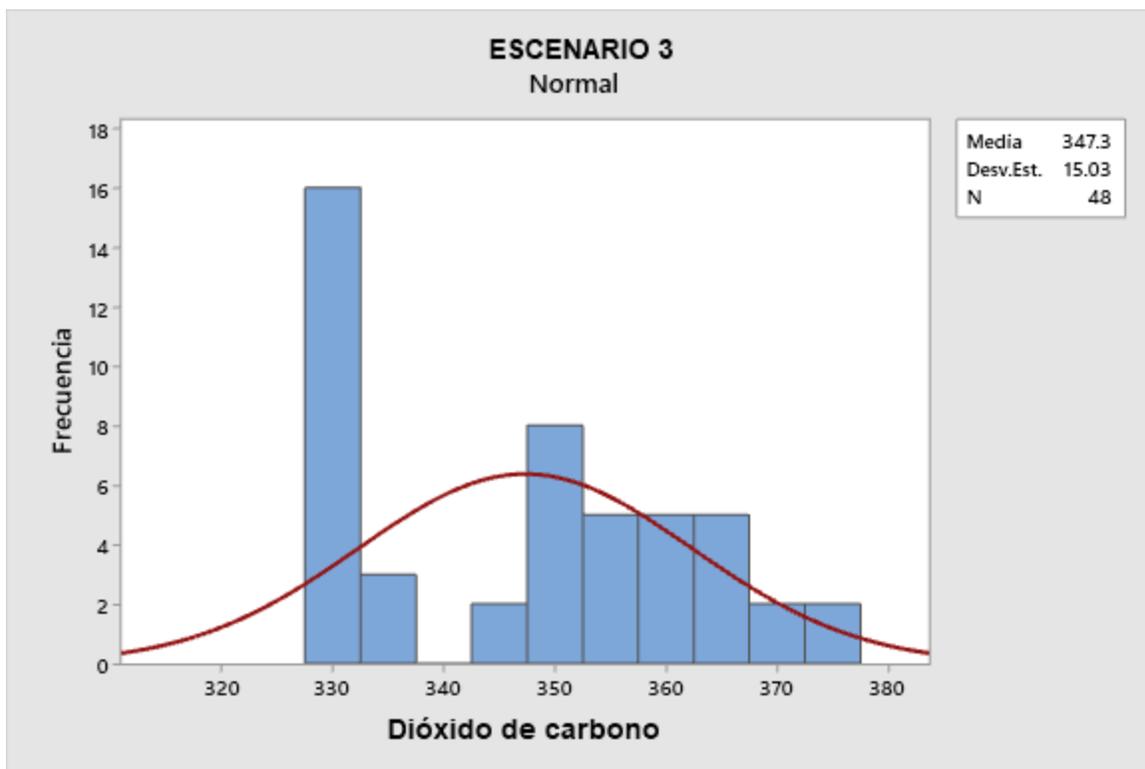


Figura 11 Grafica de normalidad escenario



Dispersión de los datos

La figura 12 muestra la dispersión de los datos en el escenario uno. Este escenario corresponde a la zona de arbolado de alta densidad, con una representación de cerramiento en la copa de los árboles. El punto del sensor se localiza a 13 m sobre el nivel del suelo y cada punto en la gráfica representa la concentración de CO₂ en ppm en una hora específica.

La información graficada corresponde a las mediciones de concentración de CO₂ a lo largo del día. En el eje de las X se observan las horas de día, iniciando a las 00:00 horas de la madrugada y terminando a las 24 horas, que en esencia corresponde al mismo horario de inicio. Las concentraciones de carbono se tomaron durante una semana completa. Al respecto, se puede observar la dispersión en el eje de las Y, lo cual muestra variación en cada hora muestreada al compararse entre los diferentes días de muestreo; sin embargo, se puede observar que la tendencia de los datos es la misma, siguiendo un patrón polimórfico.

En el periodo de la madrugada al amanecer se observa una tendencia creciente en la concentración de CO₂ alcanzando un pico máximo entre las 06:00 y 0:007 de la mañana, a partir de este horario se observa un decremento de la concentración de CO₂ alcanzando su punto más bajo aproximadamente entre las 14:00 y 15:00 horas, y posteriormente se observa un crecimiento en la concentración de CO₂, el cual continúa hasta la madrugada. Este comportamiento sugiere una tendencia sigmoideal, lo cual sugiere que la dispersión de los datos sigue un comportamiento polimórfico de orden 3. Por lo que el análisis de ajuste de los modelos de esta información se realizó considerando este patrón.



La Figura 13 muestra un comportamiento semejante al comportamiento del escenario 1. Se puede observar que, a partir de las 00 horas de la madrugada, las concentraciones de CO₂ muestran una tendencia creciente, alcanzando un pico máximo aproximadamente a las 07:00 de la mañana, y a partir de este horario se observa una tendencia decreciente en los datos, los cuales alcanzan su valor más bajo entre las 14:00 y 15:00 horas, y es a partir de este horario que la tendencia vuelve a subir hasta la madrugada. Los datos muestran que las concentraciones de CO₂ atmosférico parecen ser mayores en la noche, concentración que al parecer inicia su crecimiento a medio día. En contra parte a partir del amanecer, las tendencias en las concentraciones de carbono decrecen considerablemente.

El escenario 3, el cual corresponde a los valores de las concentraciones de CO₂ en las áreas desprovistas de vegetación, también muestra una tendencia semejante a la que muestran los dos escenarios anteriores. Se observa un crecimiento en la distribución de los datos en la madrugada, alcanzando un pico aproximadamente a las 8 de la mañana (Figura 14). A partir de este horario las concentraciones de CO₂ muestran una tendencia decreciente hasta las 15:00 -16:00 horas, momento en el cual la tendencia de la curva vuelve a subir hasta la madrugada.

Con base en las comparaciones cualitativas y de apreciación, se observa que en la zona desprovista de vegetación los picos tanto descendente como ascendente de las concentraciones de CO₂ se presentan al menos una hora después que en las zonas con presencia de vegetación.

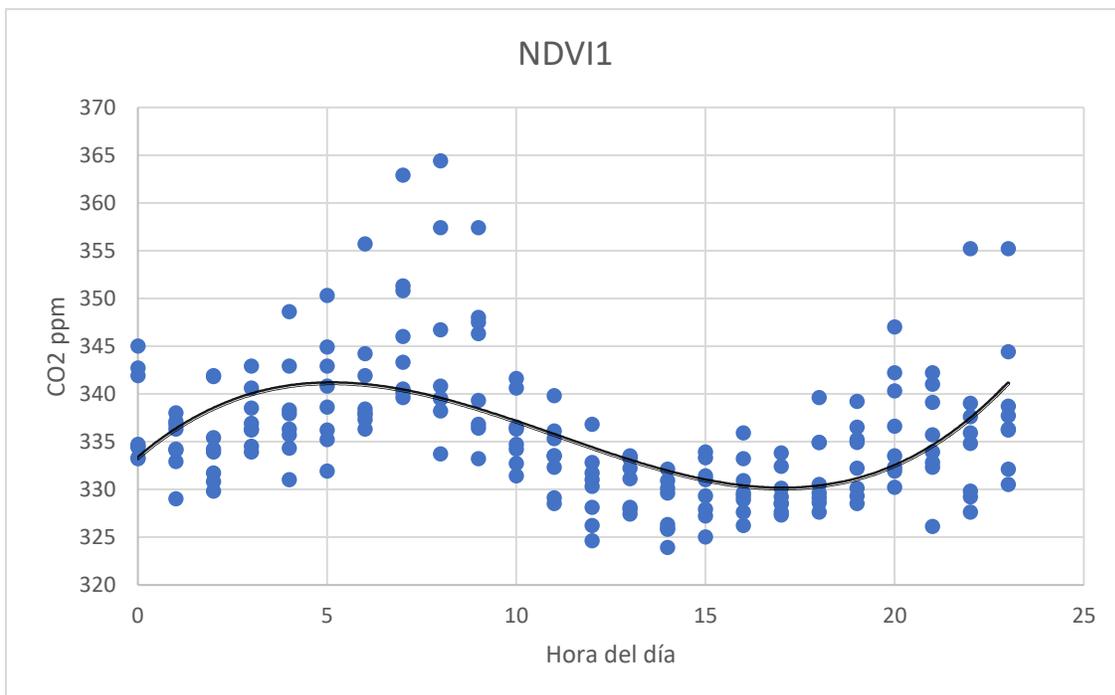


Figura 12. Dispersión de los datos del escenario 1

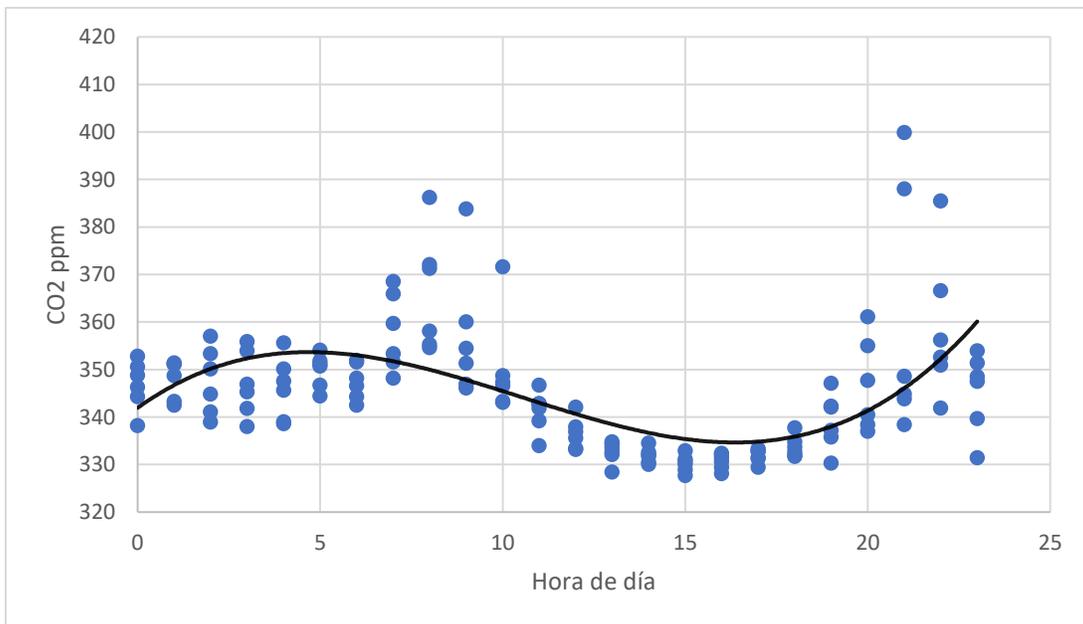


Figura 13. Dispersión de los datos del escenario 2

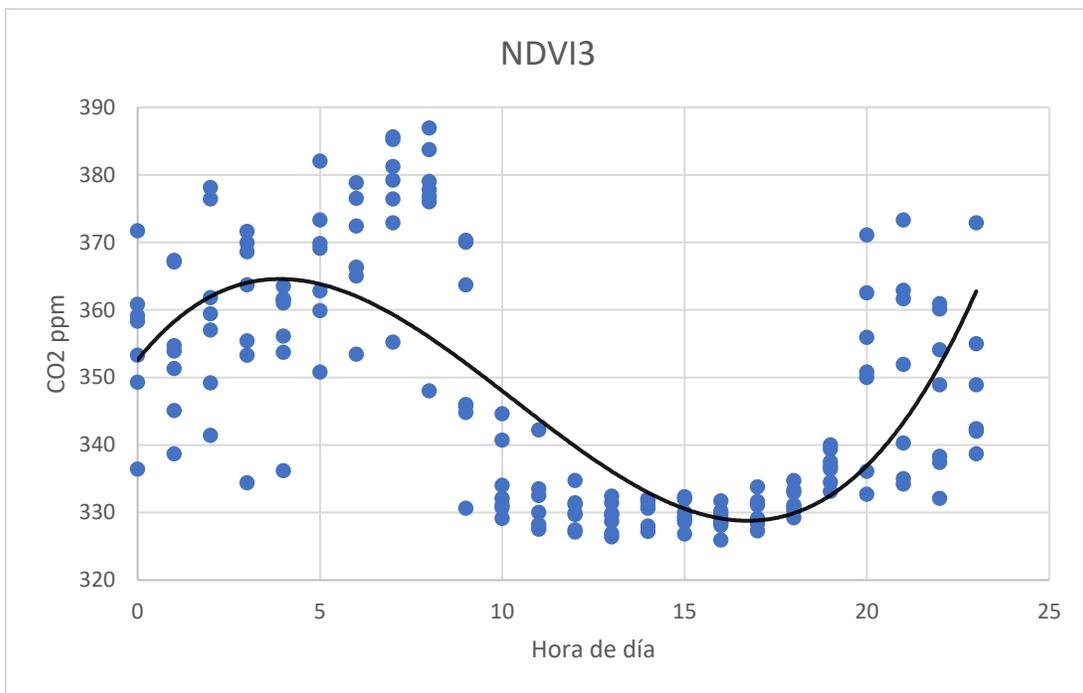


Figura 14. Dispersión de los datos del escenario 3



Ajuste de modelos de regresión.

El cuadro 4 muestra los estadísticos de regresión que se obtuvieron como resultado de los ajustes de los tres modelos lineales polinómicos de orden cubico. Estos modelos se aplicaron a cada uno de los escenarios. Como resultado se puede observar que los coeficientes de determinación se muestran con valores bajos. Estos valores son de 0.28, 0.29 y 0.51 para los modelos de los escenarios 1, 2, y 3, respectivamente. Por si parte los coeficientes de correlación del modelo con las concentraciones de CO₂ muestran valores mayores (0.54, 0.55 y 0.71, respectivamente). Mientras que los errores estándar de los modelos mostraron valores de 6, 10.9 y 12.4 para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Estos valores estadísticos sugieren que existe relación entre las variables respuesta (concentración de CO₂ y los modelos probados de cada escenario) y que pueden ser válidos para la predicción de dicha variable.

Más adelante, se muestran los valores de los estadísticos de los análisis de varianza de las regresiones (Cuadro 5), así como los valores de los parámetros de cada modelo. Adicionalmente, se presenta un ajuste de los mismos modelos, pero con el intercepto igual a cero, lo cual muestra un crecimiento considerable en el coeficiente de determinación; sin embargo, incrementa el error típico y los modelos se subestiman para los horarios cercanos a las cero horas.

Los resultados del análisis de varianza se muestran en el cuadro 5, donde se puede observar que con base en el valor de Fc los tres modelos mostraron ajustes significativos considerando un nivel de significancia > 0.05 . Lo cual indica que al



menos un parámetro de cada modelo es diferente de cero (Cuadro 5). Por tanto, se estimaron los valores de los parámetros del modelo bajo el supuesto de mínimos cuadrados ordinarios.

Los valores de los parámetros de los modelos ajustados para los tres escenarios de concentración de CO₂ en partes por millón se muestran en el Cuadro 6. Es posible observar que los parámetros para los tres modelos presentan valores significativos de acuerdo con las pruebas de T de student con un nivel de significancia ($\alpha < 0.05$). Adicionalmente, en el Cuadro 6 se muestran los errores estándar de cada parámetro, así como sus intervalos de confianza estimados con un nivel de significancia $\alpha < 0.05$.



Cuadro 4. Estadísticos de regresión de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua

NDVI1	Coeficiente de correlación	0.54777844
	R2	0.30006122
	R2 ajustado	0.28889198
	Error típico del modelo	6.00709067
NDVI2	Coeficiente de correlación	0.55390805
	R2	0.30681413
	R2 ajustado	0.29196015
	Error típico del modelo	10.9767695
NDVI3	Coeficiente de correlación	0.71773113
	R2	0.51513798
	R2 ajustado	0.50626855
	Error típico del modelo	12.4525806



Cuadro 5. Análisis de varianza de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua.

Escenario	Fuente de Variación	G.L.	SC	CM	Fc	Pvalue
NDVI1	Regresión	3	2908.28	969.43	26.86	0.00001
	Residuos	188	6784.01	36.09		
	Total	191	9692.28			
NDVI2	Regresión	3	7466.25	2488.75	20.66	0.00001
	Residuos	140	16868.53	120.49		
	Total	143	24334.78			
NDVI3	Regresión	3	27018.92	9006.31	58.08	0.00001
	Residuos	164	25430.95	155.07		
	Total	167	52449.87			



Cuadro 6. Parámetros de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua.

Escenario		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
NDVI1	β_0	333.0579 94	1.519	219.331	1.7774E- 228	330.062	336.054
	β_1	3.487730 -	0.584	5.971	1.15445E- 08	2.335	4.640
	β_2	0.440009	0.060	-7.386	4.77651E- 12	-0.558	-0.322
	β_3	0.013205 341.9261	0.002	7.781	4.63459E- 13	0.010	0.017
NDVI2	β_0	35	3.154	108.402	6.228E- 137	335.690	348.162
	β_1	5.526376 -	1.213	4.554	1.13286E- 05	3.127	7.925
	β_2	0.756854	0.124	-6.097	9.95567E- 09	-1.002	-0.511
	β_3	0.023954 352.8183	0.004	6.758	3.46802E- 10	0.017	0.031
NDVI3	β_0	48	3.313	106.499	2.6204E- 153	346.277	359.360
	β_1	6.485832 -	1.274	5.089	9.76898E- 07	3.969	9.002
	β_2	1.027677	0.130	-7.882	4.25238E- 13	-1.285	-0.770
	β_3	0.033146	0.004	8.904	9.74978E- 16	0.026	0.040



Análisis de regresión con el intercepto igual a Cero.

Se realizó un análisis de regresión para los tres escenarios estudiados, para lo cual se ajustaron modelos lineales de orden cubico con el intercepto igual a cero. Los resultados de este análisis se presentan en los cuadros 7, 8 y 9, en los que se observa la información de estadísticos básicos de regresión, análisis de varianza y valores e intervalos de confianza de los parámetros.

Tanto el coeficiente de correlación de Pearson R , como el coeficiente de determinación r^2 mostraron un considerable crecimiento comparados con los mismos parámetros, pero con los ajustes de modelos sin forzar el intercepto igual a cero; sin embargo, el error estándar del modelo incremento considerablemente. Siendo casi diez veces mayor en los modelos con intercepto igual a cero en comparación con los modelos sin modificar el intercepto.

Por su parte en el análisis de varianza (Cuadro 8) se puede observar que los valores de F calculada son relativamente altos, lo cual muestra que al menos un parámetro del modelo es diferente de cero y que el modelo podría predecir los valores de concentración de CO₂ en ppm. Al ser comparados con F de tablas se muestran valores de Pvalue menores a 0.05 para los tres escenarios estudiados.

En el caso de los parámetros, se observa que tanto el intercepto como los tres parámetros de pendiente del modelo polimórfico son significativos considerando un $\alpha < 0.05$, lo cual se comprobó con los valores de la prueba de T de student, los cuales se agregaron en el Cuadro 9. Por tanto, estos parámetros



permiten estimar de manera confiable los valores de concentración de CO_2 usando las horas del día como variable predictiva.

Es importante destacar que al forzar el intercepto de los modelos igual a cero, estamos suponiendo que a las cero horas las concentraciones de CO_2 serían igual a cero, lo cual es falso, por lo que estos modelos subestiman considerablemente la concentración de carbono en las horas cercanas a las cero horas.



Cuadro 7. Estadísticos de regresión de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua (Intercepto igual a cero).

NDVI1	Coeficiente de correlación	0.9589327
	R2	0.91955193
	R2 ajustado	0.91340962
	Error típico del modelo	96.0242649
NDVI2	Coeficiente de correlación	0.95739176
	R2	0.91659899
	R2 ajustado	0.9083238
	Error típico del modelo	100.803106
NDVI3	Coeficiente de correlación	0.95512212
	R2	0.91225826
	R2 ajustado	0.90513412
	Error típico del modelo	103.98707



Cuadro 8. Análisis de varianza de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua (Intercepto igual a cero)

Escenario	Fuente de Variación	G.L.	SC	CM	Fc	Pvalue
NDVI1	Regresión	3	19919774. 7	6639924.8 9	720.113	8.752E-103
	Residuos	189	1742704.6 4	9220.6594 5		
	Total	192	21662479. 3			
NDVI2	Regresión	3	15746172. 5	5248724.1 8	516.54	1.7475E-75
	Residuos	141	1432738.5 2	10161.266 1		
	Total	144	17178911. 1			
NDVI3	Regresión	3	18550438. 9	6183479.6 2	571.8396	1.3713E-86
	Residuos	165	1784196.2 9	10813.310 8		
	Total	168	20334635. 2			



Cuadro 9. Parámetros de los modelos ajustados para los tres escenarios de CO₂ en Chihuahua. Con intercepto igual a cero

Escenario	Parámetro	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
NDVI1	β_0	0.000000					
	β_1	110.108232	5.177	21.271	0.000	99.897	120.319
	β_2	-9.536168	0.684	-13.950	0.000	-10.885	-8.188
	β_3	0.239469	0.022	11.118	0.000	0.197	0.282
NDVI2	β_0	0.000000					
	β_1	114.225724	6.276	18.202	0.000	101.819	126.632
	β_2	-9.998101	0.829	-12.064	0.000	-11.636	-8.360
	β_3	0.253347	0.026	9.702	0.000	0.202	0.305
NDVI3	β_0	0.000000					
	β_1	118.647847	5.994	19.796	0.000	106.814	130.482
	β_2	-10.563308	0.791	-13.346	0.000	-12.126	-9.001
	β_3	0.269846	0.025	10.820	0.000	0.221	0.319



Tendencia de los modelos predictivos de CO₂ en la zona urbana de Chihuahua.

La Figura 15 muestra las tendencias de los modelos ajustados para la concentración de CO₂ en los tres escenarios estudiados. Se observa que la concentración de CO₂ se presenta en un rango desde las 320 ppm hasta las 380 ppm, con tendencias crecientes y decrecientes de acuerdo con la hora del día en la que se tome la muestra. El comportamiento de los tres escenarios es semejante, de tal manera que las líneas siguen casi los mismos patrones de concentración del gas durante el día.

La línea que se encuentra localizada en la porción inferior corresponde al escenario con mayor densidad de arbolado, la línea que se localiza en la porción media corresponde al escenario con medio nivel de densidad de arbolado, mientras que la línea superior muestra las concentraciones de CO₂ en espacios abiertos. Las mediciones de CO₂ fueron medidas a partir de las 00:00 horas de la madrugada hasta las 23:59 horas.

Es posible observar que la concentración de CO₂ es creciente durante la madrugada, llegando a un pico máximo de concentración del gas al amanecer. Posteriormente se observa una caída continua en la concentración del gas hasta aproximadamente las 15:00, momento en el cual la concentración de CO₂ vuelve a mostrar una tendencia creciente.

Al observar cada línea de manera independiente se puede visualizar que la curva de concentración de CO₂ de la zona más arbolada es la que presenta las menores concentraciones de CO₂ (323.9 ppm), mientras que las líneas de media y



alta concentración de CO₂ muestran tendencias semejantes, pero con mayores concentraciones del CO₂ (327.7 y 325.9 ppm respectivamente). Adicionalmente se destaca el comportamiento de la línea de concentración de CO₂ en sitios sin vegetación. En este escenario la concentración de CO₂ disminuye más que los otros dos escenarios al medio día, lo cual podría deberse a diferentes condiciones en el radio de influencia de la estación de monitoreo atmosférico en donde destaca la temperatura, velocidad de viento, radiación solar, tipo de uso de suelo o actividades antropogénicas.

Este comportamiento muestra evidencia que, en las zonas abiertas sin presencia de árboles, las concentraciones de CO₂ parecen tener mayor acumulación; sin embargo, a medio día en el intervalo aproximadamente de 13:00 a 16:00 horas, la concentración de CO₂ es menor en las áreas abiertas que sobre el dosel de los árboles. Este comportamiento de las concentraciones de CO₂ diurno podríamos hipotéticamente establecerla como una condición estándar en la masa de gases contenidos en la baja atmosfera y que pueden ser múltiples factores los que influyen sobre el comportamiento en la concentración del CO₂ en la atmosfera.

Se concluye que el CO₂ atmosférico a una altura aproximada de 12 m sobre el suelo en donde tiene mayores concentraciones durante la noche, alcanzando su pico máximo al amanecer y posteriormente la concentración disminuye continuamente hasta aproximadamente las 15:00, y a partir de este horario la concentración del gas incrementa nuevamente. Este comportamiento de variabilidad temporal se observó en forma horaria destacando la influencia del tráfico vehicular, la estabilidad atmosférica y temperatura.



Una de las variables que parece mantener relación con este fenómeno es la temperatura. Al respecto, se generaron modelos del comportamiento de la temperatura con base en datos de esta variable los cuales fueron colectados por el sensor al mismo tiempo y en los mismos sitios de colecta de los datos de CO₂.

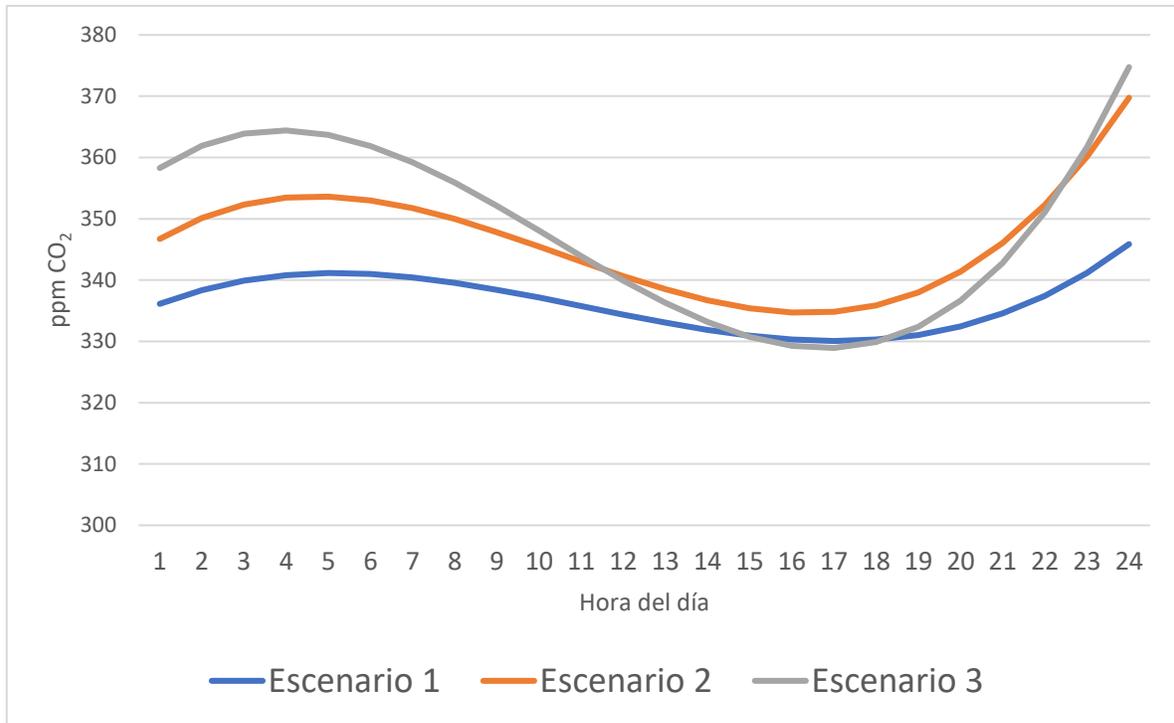


Figura 15 Comportamiento en concentración de CO₂ en el día para los tres escenarios estudiados



Ajuste de modelos para graficar el comportamiento de la temperatura

Los cuadros 10, 11 y 12 muestran los valores de los estadísticos, los análisis de varianza y los parámetros de los modelos ajustados de temperatura. Las tendencias de los datos de temperatura cuando se grafican de acuerdo con las horas del día siguen patrones polimórficos. Los datos de temperatura fueron tomados de manera pareada por sensores de temperatura localizados en la antena en una posición semejante al sensor que colectó los datos de concentración de CO₂.

Con base en este antecedente, se ajustaron modelos lineales polimórficos de orden cubico para predecir la temperatura en función de la hora del día. Los estadísticos de prueba mostraron ajustes aceptables, mientras que los parámetros de los modelos resultaron ser altamente significativos.

El cuadro 10 muestra los valores de los coeficientes de correlación de los modelos con la variable temperatura, los cuales mostraron valores de 0.83, 0.81 y 0.87 para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente, mientras que los valores del coeficiente de determinación fueron de 0.69, 0.65 y 0.77 para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Estos datos indican que los modelos explican porcentajes de variación superiores al 65 %. Por lo que se podrían considerar que los modelos para la estimación de temperatura para los sitios de estudio son aceptables. Adicionalmente se muestran los errores estándar de los modelos, los cuales se observan en el Cuadro 10.

El cuadro 11 muestra los resultados de los análisis de varianza, los cuales muestran valores altos de Fc, por lo que se concluye que al menos un parámetro de



cada modelo es diferente de cero y muestra algún grado de relación entre las variables predictivas y la variable respuesta.

Por su parte el cuadro 12 muestra los resultados de los parámetros de los modelos para estimar la temperatura en función de la hora del día con sus componentes cuadráticos y cúbicos. Estos modelos fueron utilizados para generar valores predichos y dibujar las curvas ajustadas de temperatura, las cuales fueron comparadas gráficamente con las curvas de concentraciones de CO₂, con la intención de identificar de manera interpretativa, posibles relaciones entre las concentraciones del gas y las temperaturas.



Cuadro 10. Estadísticos de regresión de los modelos ajustados para los tres escenarios de temperatura en Chihuahua

TEMP1	Coeficiente de correlación	0.83102038
	R2	0.69059487
	R2 ajustado	0.68758118
	Error típico del modelo	4.12371532
TEMP2	Coeficiente de correlación	0.81020441
	R2	0.65643119
	R2 ajustado	0.65487187
	Error típico del modelo	4.59085396
TEMP3	Coeficiente de correlación	0.8798959
	R2	0.7742168
	R2 ajustado	0.77161161
	Error típico del modelo	3.15417831



Cuadro 11. Análisis de varianza de los modelos ajustados para los tres escenarios de temperatura en Chihuahua

Escenario	Fuente de Variación	G.L.	SC	CM	Fc	Pvalue
TEMP1	Regresión	3	11690.2528	3896.75092	229.152866	4.0621E-78
	Residuos	308	5237.54864	17.0050281		
	Total	311	16927.8014			
TEMP2	Regresión	3	26617.2929	8872.43097	420.974387	7.482E-153
	Residuos	661	13931.1964	21.0759401		
	Total	664	40548.4893			
TEMP3	Regresión	3	8869.86047	2956.62016	297.182377	1.0852E-83
	Residuos	260	2586.69861	9.94884081		
	Total	263	11456.5591			



Cuadro 12 Parámetros de los modelos ajustados para los tres escenarios de Temperatura en Chihuahua

Escenario		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
TEMP1	Intercepción	21.684117	0.80503217	26.9357151	5.8134E-83	20.1000585	23.2681756
	HORA	-1.0489212	0.30970112	-3.38688216	0.00079868	1.65831886	-0.43952354
	HORA ²	0.31981861	0.03168372	10.0941004	6.9397E-21	0.25747469	0.38216253
	HORA ³	-0.01210819	0.00090462	-13.3848168	1.616E-32	0.01388821	-0.01032817
TEMP2	Intercepción	14.1260001	0.61113162	23.1144972	4.3509E-87	12.9260068	15.3259933
	H1	-1.53740259	0.23564164	-6.52432475	1.3593E-10	2.00009894	-1.07470624
	H2	0.37166439	0.02415774	15.3849018	7.0277E-46	0.32422924	0.41909953
	H3	-0.01349271	0.0006908	-19.5320432	2.0473E-67	0.01484914	-0.01213629
TEMP3	Intercepción	22.0333484	0.66940065	32.9150387	1.0476E-94	20.7152114	23.3514853
	H	-1.11738247	0.25752279	-4.33896531	2.0508E-05	1.62447833	-0.61028661
	H2	0.31501658	0.02634566	11.9570598	1.5031E-26	0.26313856	0.3668946
	H3	-0.01181039	0.00075221	-15.7008926	1.5772E-39	0.01329159	-0.01032919



Relaciones entre la temperatura y la concentración de CO₂ atmosférico.

Al incluir los modelos de concentración de gas CO₂ y los modelos de comportamiento de temperatura, se generó una gráfica ilustrativa de las posibles relaciones entre las concentraciones de gas y la temperatura ambiental. La gráfica 8 muestra dichas tendencias, en la cual podemos observar que, aunque el comportamiento de las curvas para ambas variables es de tipo polimórfico, las pendientes de las curvas parecen ser opuestas. Lo cual parece mostrar que a medida que las temperaturas tienden a bajar, las concentraciones de CO₂ atmosférico sobre el suelo tienden a incrementar y viceversa.

La Figura 16 muestra que a las 0:00 horas de la madrugada la temperatura es generalmente baja y muestran incrementos continuos hasta medio día, sin embargo, las concentraciones de CO₂ parecen incrementar y muestran un sentido decreciente aproximadamente a las 5:00-7:00 am. momento en el cual las temperaturas parecen incrementar más rápidamente, hasta alcanzar los picos más altos de temperatura aproximadamente a las 15:00 horas, momento en el cual se alcanzan los picos más bajos de concentraciones de CO₂, y posteriormente las temperaturas descienden, mientras que las concentraciones de CO₂ incrementan.

Por otra parte, es interesante observar que la temperatura del escenario 2 parece mostrar temperaturas más bajas que los escenarios 1 y 3. Este comportamiento se debe a que la colecta de información se realizó en el mes de octubre, mes en el cual las temperaturas ya se encuentran sensiblemente más bajas en comparación con las temperaturas de agosto y septiembre, fechas en las que se colectaron los datos para los escenarios 1 y 3.

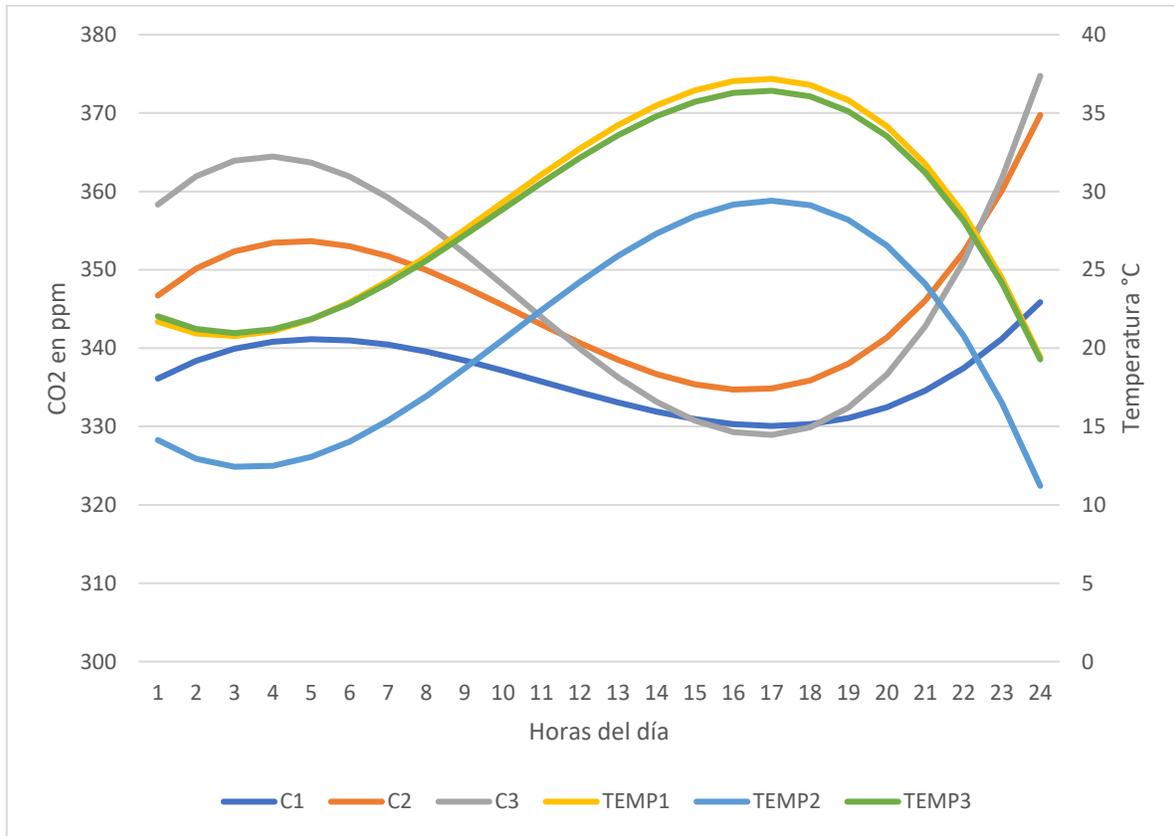


Figura 16. Comportamiento de los modelos de concentración de CO₂ y temperatura en los tres escenarios estudiados en Chihuahua.



DISCUSIÓN

Análisis estadístico básico de las variables.

Con la finalidad de dar certeza a la investigación y validar los datos obtenidos en el protocolo de muestreo, realizamos el proceso de análisis de los parámetros estadísticos básicos, pruebas de normalidad y dispersión de datos, lo cual debe ser un procedimiento estándar para cualquier investigación. Torres, *et al* (2012), mencionan que los datos de investigación sirven para certificar los resultados y son reconocidos por la comunidad científica. Los valores medios de los tres escenarios fueron aumentando desde 335.82 ppm en el escenario 1 con una alta cobertura vegetal hasta 347.46 ppm escenario 3 sin cobertura vegetal con un gradiente de variación de 11.25 ppm, así mismo entre el escenario 2 y 3 el gradiente de variación disminuyó en un valor de 2.35 ppm. Este patrón también fue observado en otras ciudades (Remy. *et al.*, 2016).

Con el análisis de dispersión de los datos nosotros observamos un comportamiento polinomial en la tendencia diurna de los tres escenarios establecidos, lo que nos permitió inferir el posible desarrollo de un modelo predictivo del comportamiento de la concentración de CO₂ en áreas forestales urbanas.

El comportamiento horario de las concentraciones de CO₂ en los escenarios estudiados muestra incrementos y decrementos en diferentes periodos del día, de tal manera que aproximadamente a las 5:00 p.m. se observa un incremento, el cual continúa durante la noche y madrugada e inicia una disminución aproximadamente a las 7:00 a.m., hasta alcanzar su punto mínimo aproximadamente de 12:00 a 14:00



horas este comportamiento también fue observado por (Tiemoko, *et al.*, 2024, Park., *et al.*, 2022). Esta variación podría relacionarse con el comportamiento de algunas variables climáticas, meteorológicas o la actividad antropogénica como la temperatura, radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa, tráfico vehicular o la altura máxima de mezclado (Hong *et al.*, 2023, Tiemoko, *et al.*, 2024, Park, *et al.*, 2022, Zhang, *et al.*, 2024). La antena para el monitoreo de la concentración de CO₂ fue colocada a una altura de 13 m, sobre el dosel vegetal en las zonas arboladas y sobre el suelo en el escenario 3, el cual corresponde a el monitoreo en área sin vegetación, por lo que podemos generalizar que el monitoreo se realizó a 13 m de altura sobre los elementos objetivo del muestreo (Dosel y área descubierta de vegetación).

Las tendencias en el comportamiento de las concentraciones de CO₂ fue similar en los tres escenarios; sin embargo, las concentraciones de CO₂ en el área con vegetación más densa fueron menores que en los escenarios de cobertura media y sin vegetación. Este comportamiento se pudo observar a lo largo de las 24 horas monitoreadas durante el día. En este sentido, la vegetación influye en la disminución de las concentraciones de CO₂, probablemente en una relación con la actividad fotosintética del arbolado, lo cual también fue observado por (Mitchell *et al.*, 2017), esto derivado de la ubicación del sensor en la frontera del dosel de estrato arbóreo y la altura máxima de mezclado, por otra parte, la respiración del suelo, del estrato herbáceo y arbóreo pudieron haber actuado como emisor de CO₂. Por su parte, el comportamiento de la concentración de CO₂ mostró mayores concentraciones durante la tarde, noche y madrugada comportamiento parece estar



muy relacionado con el comportamiento de las actividades antropogénica en especial con el tráfico vehicular y la condición de estabilidad atmosférica (Hong *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2021), con un evidente descenso de las concentraciones durante el día que estar correlacionado con la temperatura ambiental, ya que (Liu *et al.*, 2024), determinaron los niveles de concentración de CO₂ en forma estacional relacionarse con los cambios de temperatura.

En el escenario de densidad de arbolado medio, el comportamiento de concentración de CO₂ fue semejante a la zona de arbolado denso; sin embargo, la línea del modelo polinómico ajustado muestra que la tendencia en la concentración del CO₂ se encuentra ligeramente por encima de la línea de alta densidad. Este comportamiento proporcional permite hipotetizar que la vegetación si tiene un efecto en la disminución de concentración del CO₂ durante el periodo de activación de la fotosíntesis. Sin embargo, (Hong, *et al.*, 2023) analizaron y determinaron que los flujos de CO₂, en algunas áreas urbanas con vegetación, era mínimo el impacto a los flujos de emisión y sumidero. Contrariamente (Salem, *et al.*, 2017) encontraron una buena correlación entre los niveles de concentración de CO₂ atmosférico y los porcentajes de cobertura vegetal urbana. Es evidente que la vegetación genera microclimas en las zonas urbanas y proporciona algunos servicios ambientales como el sumidero de CO₂, lo cual quedo demostrado en las curvas de predicción de la cobertura de alta densidad y la cobertura de media densidad, en los modelos de predicción obtenidos en bases al monitoreo de muestreos puntuales, también (Liu,*et al.*, 2024) demostraron la importancia de la vegetación como sumidero de CO₂.



además disminuye la contaminación del aire (Liu, *et al.*, 2024) y mantiene un microclima de temperatura y humedad relativa importante en las ciudades.

Por su parte, se observa que, para el escenario desprovisto de vegetación, la línea del modelo ajustado de concentraciones de CO₂ se encuentra por arriba de los escenarios con vegetación, lo cual podría evidenciar que en cualquier área de una zona urbana sin cobertura arbórea las concentraciones de CO₂ atmosférico serán más altas con valores arriba de 400 ppm. Este dato es muy importante, para las autoridades que desarrollan los programas de reforestación con enfoque de mitigación del cambio climático, ya que podrán estimar la cantidad de CO₂ capturado y focalizarlo al mercado de bonos de carbón.



CONCLUSIONES

Las variaciones diurnas de las concentraciones de CO₂ atmosférico en la frontera del estrato arbóreo y en función de la cobertura vegetal se observaron cambios de concentración importantes, durante el periodo de las 00:00 a las 06:00 horas en donde se promediaron los valores más altos y en el período de las 11:00 a las 17:00 los valores más bajos. Los valores más altos monitoreados concluimos que están influenciados por el tráfico vehicular y la estabilidad atmosférica local. Así mismo los valores más bajo son influenciados por la actividad fotosintética de la vegetación destacando como principal contribuyente la masa aérea del estrato arbóreo.

El modelo ajustado para el escenario sin vegetación muestra que los valores de las concentraciones de CO₂ siguen una tendencia aparentemente normal temporal a nivel atmosférico con valores típicos mayores en la madrugada y en la noche y valores típicos menores en el día. Se concluye que este comportamiento de la curva de tendencia de predicción se observaría en cualquier sitio urbano con una característica principal sin cobertura arbórea.

Como resultado del análisis realizado en esta investigación y el desarrollo de los modelos de predicción de las concentraciones de CO₂ en el dosel del estrato arbóreo, reafirmamos que si existe una relación entre la biomasa forestal urbana y las concentraciones del dióxido de carbono atmosférico. También derivado del análisis de ajuste del modelo en donde se incluyó la temperatura ambiental se pudo visualizar la importancia de este parámetro en el proceso fotosintético de la vegetación incrementando el sumidero de CO₂



LITERATURA CITADA

- Aikawa, A., Sato, S., Sato, Y., & Takayama, I. (1993). A study on the interpersonal behaviors of lonely university students: The relationship between the self-reported loneliness and social skill deficits. *Japanese Journal of Social Psychology*, 8, 44–55.
- Akbari, H. (2002). Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environ. Pollut.* 116, S119–S126, [http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00264-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00264-0).
- Alonzo, M., Bookhagen, B., & Roberts, D. A. (2014). Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ.* 148, 70–83. doi:10. 1016/j.rse.2014.03.018
- Baldocchi, D. B. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9, pp. 479-492.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001). FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82, 2415e2434. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2). bg-10-753-2013. Biodiversity support programme Publications Database #25. Washington, DC USA 10 pp.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D.J., & Terradas, J. (2014). Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. *Ambio* 43 (4), 466–479, <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>.
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecol. Econ.* 29(2), 293–301, [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-8009\(99\)00013-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-8009(99)00013-0).



- Bradshaw, A., Hunt, B. & Walmsley, T. (1995). *Trees in the Urban Landscape. Principle sand practice.* E&FN Spon.40 pp.
- Brown, S., Hall, C.A.S., Knabe, W., Raich, J., Trexler, M. C. & Woomer, P. (1993). Tropical forests their past present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air, Soil Pollution.*70:71-94.
- Brown, S., Sathaye, M., Cannell, M. & Kauppi, P. (1996). Mitigation of Carbon Emission to the Atmosphere by Forest Management. *Common. Wealth For Rev,* 75: 80-91.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). Food & Agriculture Org..
- Brown, S. (1999). Guidelines for Inventorying and Monitoring Carbon Offsets in Forest. Based Projects. A report prepared for the World Bank, Washington, DC USA 13 pp.
- Bruhwieler, L., Michalak, A. M., Birdsey, R., Fisher, J. B., Houghton, R. A., Huntzinger, D. N., & Miller, J. B. (2018). Chapter 1: Overview of the global carbon cycle. *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*, US Global Change Research Program, Washington DC, 42-70.
- Canadell, J.G., Le Quere, C., Raupach, M.R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillet, N.P., Houghton, R.A., & Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(47), 18866-18870
- Casey, B. (1997). Free markets plan to cut pollution goes global. *Chicago Tribune.* May 15, 1997. 3, 1:5
- Chen, S., Lin, G., Huang, J. & Jenerette, G. D. (2009) Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Glob. Change Biol.* 15, 2450–2461. [https:// doi. org/ 10. 1111/j.1365- 2486. 2009. 01879.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01879.x).
- Conway, T. M., & Vecht, J. V. (2015). *Growing a Diverse Urban Forest: Species Selection Decisions by Practitioners Planting and Supplying Trees.*



- Landscape and Urban Planning 138: 1-10. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.01.007
- Coutts, A.M., Tapper, N.J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). Wateringour cities: the capacity for water sensitive urban design to support urbancooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Prog.Phys. Geogr.* 37 (1), 2–28, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133312461032>.
- Daniel, S. (1995). Making a real difference is part of the "fun" at AES Washington Post. May 22, 1995, 13:3
- Dasgupta, S., Gosain, A.K., Rao, S., Roy, S., & Sarraf, M. (2013). A megacity in a changingclimate: the case of Kolkata. *Clim. Change* 116 (3–4), 747–766, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0516-3>.
- De Groot, M., Diaci, J., & Ogris, N. (2019). Forest Management History is an Important Factor in Bark Beetle Outbreaks: Lessons for the Future. *Forest Ecology and Management* 433: 467- 474. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.025
- De Fries, R. S., Hansen, M., Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. (1998). Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: The use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 19(16), 3141-3168.
- Detwiler, R.P. & Hall, C.A.S. (1988). Tropical Forests and the Global Carbon Cycle. *Science*, 23:42-47.
- Devisscher, T., Ordóñez-Barona, C., Dobbs, C., Dias Baptista, M., Navarro, N. M., Orozco Aguilar, L. A., Cercas Perez, J. F., Rojas Mancebo, Y., & Escobedo, F. J. (2022). Urban Forest Management and Governance in Latin America and the Caribbean: A Baseline Study of Stakeholder Views. *Urban Forestry and Urban Greening* 67: 127441. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127441
- Dwyer, J. F., McPherson, E. G., Schroeder, H. W., & Rowntree, R. A. (1992). Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 18(5), 227-234.



- Wyer, L., & Kim, C. W. (2003). Destination competitiveness: a model and indicators. *Current Issues in Tourism*, 6(5), 369–413. *Current Issues in Tourism*, 6(5), 369–413.
- Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., & Shine, K. P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 43(24), 12-614.
- Evans, J. R., & Santiago, L. S. (2014). PrometheusWiki gold leaf protocol: gas exchange using LI-COR 6400. *Functional Plant Biology*, 41(3), 223-226.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., ... & Schaaf, C. (2002). Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 287-302.
- Gauthier, M. (2003). The FAO program on urban and peri-urban forestry. *For. Chron.* 79 (5), 836.
- Gratani, L., Varone, L., & Bonito, A. (2016). Carbon sequestration of four urban parks in Rome. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 184-193.
- Grimmond, C. S. B., King, T. S., Cropley, F. D., Nowak, D. J., & Souch, C. (2002). Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 116, S243-S254.
- Gülçin, D., & van Den Bosch, C. C. K. (2021). Assessment of above-ground carbon storage by urban trees using LiDAR data: The case of a university campus. *Forests*, 12(1), 62.
- Gurjar, B. R., Butler, T. M., Lawrence, M. G., & Lelieveld, J. (2008). Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric environment*, 42(7), 1593-1606.
- Han, H. (2005). Effect of carbon fixation and oxygen release about urban greening plants. *J. Northeast For. Univ.* 33, 68–70. doi:10.1360/biodiv.050121
- Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R., & Sohlberg, R. (2000). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International journal of remote sensing*, 21(6-7), 1331-1364.



- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, K. von Schuckmann, D. J. Beerling, J. Cao, S. Marcott, V. Masson-Delmotte, M. J. Prather, E. J. Rohling, J. Shakun, P. Smith, A. Lacis, G. Russell, & Ruedy R. (2017): Young people's burden: Requirement of negative CO₂ emissions. *Earth System Dynamics*, 8(3), 577-616, doi: 10.5194/esd-8-577-2017.
- Heath, L. S., Smith, J. E., Skog, K. E., Nowak, D. J., & Woodall, C. W. (2011). Managed Forest carbon estimates for the US greenhouse gas inventory, 1990—2008. *Journal of Forestry*, 109(3), 167-173.
- Henninger, S., & Kuttler, W. (2010). Near surface carbon dioxide within the urban area of Essen, Germany. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2), 76-84.
- Hong, S. O., Kim, J., Byun, Y. H., Hong, J., Hong, J. W., Lee, K., Park L.S., Lee S.S. & Kim, Y. H. (2023). Intra-urban variations of the CO₂ fluxes at the surface-atmosphere interface in the seoul metropolitan area. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 59(4), 417-431.
- Hong, J. W., Lee, S. D., Lee, K., & Hong, J. (2020). Seasonal variations in the surface energy and CO₂ flux over a high-rise, high-population, residential urban area in the East Asian monsoon region. *International Journal of Climatology*, 40(10), 4384-4407.
- Houghton, R.A., Boone, R. D. & Fruci, J. R. (1987). The flux of carbon from terrestrial
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Idso, C. D., Idso, S. B., and Balling, R. C., Jr. (1998). The urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona. *Phys. Geogr.* 19, 95–108. doi:10.1080/02723646.1998.10642642
- Inkiläinen, E. N., McHale, M. R., Blank, G. B., James, A. L., & Nikinmaa, E. (2013). The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA. *Landscape and urban planning*, 119, 91-103.



- Intasen, M., Hauer, R. J., Werner, L. P., & Larsen, E. (2017). Urban forest assessment in Bangkok, Thailand. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(2), 148-163.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., ... & Xie, S. P. (2013). Technical summary. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 33-115). Cambridge University Press.
- Chen, W. Y., & Jim, C. Y. (2008). Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. *Ecology, planning, and management of urban forests: international perspectives*, 53-83.
- Justice, CO, Townshend, JRG, Holben, BN & Tucker, CJ. (1985). Análisis de la fenología de la vegetación global utilizando datos satelitales meteorológicos. *Int. J. Remote Sensing* 6, 1271-1318
- Kim, J., Kang, Y., Kim, D., Son, S., & Kim, E. J. (2024). Carbon Storage and Sequestration Analysis by Urban Park Grid Using i-Tree Eco and Drone-Based Modeling. *Forests*, 15(4), 683.
- King, A. W., Andres R. J., Davis K. J., Hafer M., Hayes D. J., Huntzinger D. N., de Jong B., Kurz W. A., McGuire A. D., Vargas R., Wei Y., West T. O., & Woodall C. W. (2015): North America's net terrestrial CO₂ exchange with the atmosphere 1990-2009. *Biogeosciences*, 12(2), 399-414, doi: 10.5194/bg-12-399-2015.
- Kulak, M., Graves, A., & Chatterton, J. (2013). Reducing greenhouse gas emissions with urban agriculture: A Life Cycle Assessment perspective. *Landscape and urban planning*, 111, 68-78.
- Le Quere, C., R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Pongratz, A. C. Manning, J. I. Korsbakken, G. P. Peters, J. G. Canadell, R. B. Jackson, T. A. Boden, P. P. Tans, O. D. Andrews, V. K. Arora, D. C. E. Bakker, L. Barbero, M. Becker, R. A. Betts, L. Bopp, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, C. E. Cosca, J. Cross,



- K. Currie, T. Gasser, I. Harris, J. Hauck, V. Haverd, R. A. Houghton, C. W. Hunt, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Kato, M. Kautz, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Kortzinger, P. Landschutzer, N. Lefevre, A. Lenton, S. Lienert, I. Lima, D. Lombardozzi, N. Metzl, F. Millero, P. M. S. Monteiro, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S.-i. Nakaoka, Y. Nojiri, X. A. Padin, A. Peregón, B. Pfeil, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, J. Reimer, C. Rodenbeck, J. Schwinger, R. Seferian, I. Skjelvan, B. D. Stocker, H. Tian, B. Tilbrook, I. T. van der Laan-Luijkx, G. R. van der Werf, S. van Heuven, N. Viovy, N. Vuichard, A. P. Walker, A. J. Watson, A. J. Wiltshire, S. Zaehle, & D. Zhu, (2017). Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data Discussions*, 1-79, doi: 10.5194/essd-2017-123.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padin, X. A., Peregón, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehle, S., & Zhu, D.: Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405–448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>, 2018.
- Li, X., Chang, J. S., Tian, M., & Park, S. E. (2001). CO₂ reforming of methane over modified Ni/ZrO₂ catalysts. *Applied organometallic chemistry*, 15(2), 109-112.



- Li, X., Aguila, L. C. R., Wu, D., Lie, Z., Xu, W., Tang, X., & Liu, J. (2023). Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages. *Science of the Total Environment*, 904, 166962.
- Liu, H., Yang, L., Wang, Y., Huang, J., Zhu, J., Yunxia, W., ... & Liu, G. (2008). Yield formation of CO₂-enriched hybrid rice cultivar Shanyou 63 under fully open-air field conditions. *Field Crops Research*, 108(1), 93-100.
- Lotsch, A., Friedl M. A., Anderson B. T., & Tucker, C. J. (2003). Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1774, doi:10.1029/2003GL017506, 14.
- Malo, A., & Nicholson, S.E. (1990). Un estudio de la dinámica de las precipitaciones y la vegetación en el Sahel africano utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada. *J. Arid Envrion.* 19 , 1-24
- McPherson, E. G., Nowak, D. J., & Rowntree, R. A. (1994). Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project.(Includes executive summary). Forest Service general technical report (Final) (No. PB-94-203221/XAB; FSGTR-NE-186). Forest Service, Delaware, OH (United States). Northeastern Forest Experiment Station.
- McPherson, G. E., Simpson, J. R., Xiao, Q., & Chunxia, W. (2008). Los Angeles 1-million tree canopy cover assessment. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-207. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 52 p, 207.
- McPherson, G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Maco, S. E., Xiao, Q., & Mulrean, E. (2004). Desert southwest community tree guide: benefits, costs and strategic planting. Arizona Community Tree Council, Inc. Phoenix, AZ.
- Melillo, J. M., Richmond, T. C., & Yohe, G. W. 2014. Climate change impacts in the United States: the third national climate assessment. US Global change research program.



- Melton, J. R., Wania, R., Hodson, E. L., Poulter, B., Ringeval, B., Spahni, R., Bohn T., Avis C. A., Beerling D. J., Chen G., Eliseev A. V., Denisov S. N., Hopcroft P. O., Lettenmaier D. P., Riley W. J., Singarayer J. S., Subin Z. M., Tian H., Zürcher S., Brovkin V., van Bodegom P. M., Kleinen T., Yu Z. C. & Kaplan, J. O. (2013). Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences*, 10(2), 753-788.
- Mitchell, L. E., Lin, J. C., Bowling, D. R., Pataki, D. E., Strong, C., Schauer, A. J., Bares R., Bush S.E., Stephens B.B., Mendoza D., Mallia D., Holland L., Gurney K.R., & Ehleringer, J. R. (2018). Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(12), 2912-2917.
- Milich, L., & Weiss, E. (2000). GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 235-260.
- Mohd Zaki, N. A., & Abd Latif, Z. (2017). Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground-biomass modelling. *Geocarto International*, 32(7), 701-716.
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation-development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719, 137461.
- Mourshed, M. (2011). The impact of the projected changes in temperature on heating and cooling requirements in buildings in Dhaka, Bangladesh. *Applied Energy*, 88(11), 3737-3746.
- Mukhlison, M. (2015). Pemilihan jenis pohon untuk pengembangan hutan kota di kawasan perkotaan Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 7(1), 37-47.
- Munishi, P.K.T., Maliondo, S.M., Msanya, B. & Malimbwi, R.E. (2000). Biomass and carbon storage of a tropical montane rain forest ecosystem in Northern



- Tanzania. A paper presented at the Scientific Conference 2000. Sokoine University of Agriculture-Morogoro, Tanzania, from 5th – 7th April, 2000.
- Munishi, P.K.T. & Shear, T. (2004) Carbon Storage of two Afromontane rain forests in the Eastern Arc Mountains of Tanzania. *Journal of Tropical Forest Science* 16(1): 78-93
- Munishi, P.K.T. (2001). The Eastern Arc Mountain Forests of Tanzania. Their Role in Biodiversity, Water Resources Conservation, and Net Contribution to Atmospheric Carbon. Ph.D. Dissertation. NC State University, USA. 128pp.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. 2013: Anthropogenic and natural radiative forcing. In: *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, X., Xia, A., Bex, Y.V., & Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The meaning of spectral vegetation indices. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, 481 – 486.
- Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., & Running, S. W. (2002). Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 214-231.
- Nasrallah, H. A., Balling Jr, R. C., Madi, S. M., & Al-Ansari, L. (2003). Temporal variations in atmospheric CO₂ concentrations in Kuwait City, Kuwait with comparisons to Phoenix, Arizona, USA. *Environmental Pollution*, 121(2), 301-305.
- Nowak, D.J., Stevens, J.C., Sisinni, S.M. & Luley, C.J. (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture* 28 (3), 113e122.



- Nowak, D.J. (1994). Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G., Nowak, D.J., Rowntree, R.A. (Eds.), *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. USDA Forest Service General Technical Report NE-186, Radnor, PA, pp. 83e94.
- Lee, K., Hong, J. W., Kim, J., & Hong, J. (2021). Traces of urban forest in temperature and CO₂ signals in monsoon East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2021, 1-39.
- Rana, G., Martinelli, N., Famulari, D., Pezzati, F., Muschitiello, C., & Ferrara, R. M. (2021). Representativeness of carbon dioxide fluxes measured by eddy covariance over a mediterranean urban district with equipment setup restrictions. *Atmosphere* 12, 197. doi:10.3390/atmos12020197
- Reed, B. C., Brown, J. F., VanderZee, D., Loveland, T. R., Merchant, J. W., & Ohlen, D. O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of vegetation science*, 5(5), 703-714.
- Raich, J. W., & Potter, C. S. (1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global biogeochemical cycles*, 9(1), 23-36.
- Richardson, J. J., & Moskal, L. M. (2014). Uncertainty in urban forest canopy assessment: Lessons from Seattle, WA, USA. *Urban forestry & urban greening*, 13(1), 152-157
- Ronald, B. (1997). The Kyoto protocol. *The Wall Street Journal*. Dec 15, 1997. 22:3
- Rulinda, C. M., Dilo, A., Bijker, W., & Stein, A. (2012). Characterising and quantifying vegetative drought in East Africa using fuzzy modelling and NDVI data. *Journal of Arid Environments*, 78, 169–178.
- Park, C., Jeong, S., Park, M. S., Park, H., Yun, J., Lee, S. S., & Park, S. H. (2022). Spatiotemporal variations in urban CO₂ flux with land-use types in Seoul. *Carbon Balance and Management*, 17(1), 3.
- Sawka, M., Millward, A. A., Mckay, J., & Sarkovich, M. (2013). Growing summer energy conservation through residential tree planting. *Landscape and Urban Planning*, 113, 1-9.



- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon management*, 5(1), 81-91.
- Schreyer, J., Tigges, J., Lakes, T., & Churkina, G. (2014). Using airborne LiDAR and QuickBird data for modelling urban tree carbon storage and its distribution— A case study of Berlin. *Remote Sensing*, 6(11), 10636-10655.
- Schuur, E. A., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Kuhry P., Lawrence D. M., Natali S. M., Olefeldt D., Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., & Vonk, J. E., (2015): Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546), 171-179, doi: 10.1038/nature14338. *Sensing of Environment* 83, 195-213.
- Singkran, N. (2022). Carbon sink capacity of public parks and carbon sequestration efficiency improvements in a dense urban landscape. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 750.
- Soares, A.L., Rego, F.C., McPherson, E.G., Simpson, J.R., Peper, P.J., & Xiao, Q., (2011). Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban For. Urban Greening* 10 (2), 69–78, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2010.12.001>.
- Solomon, S. (2007). Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (vol. 4).
- Sun, X., Li, J., Cameron, D., & Moore, G. (2022). Sap Flow Monitoring of Two Australian Native Tree Species in a Suburban Setting: Implications for Tree Selection and Management. *Plant Science* 317: 111194. DOI: 10.1016/j.plantsci.2022.111194
- Tiemoko, T. D., Ramonet, M., Yoroba, F., Kouassi, K. B., Kouadio, K., Kazan, V., ... & Ciais, P. (2021). Analysis of the temporal variability of CO₂, CH₄ and CO concentrations at Lamto, West Africa. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 73(1), 1-24.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127 - 150.



- Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson, B. T., Alexander M., Prazeller P., Molina L., & Molina, M. (2005). Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape. *Geophysical Research Letters*, 32(20).
- Velasco, E., & Roth, M. (2010). Cities as net sources of CO₂: Review of atmospheric CO₂ exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass*, 4(9), 1238-1259.
- Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Ramos R., Hernández F., Molina L.T., & Lamb, B. (2009). Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(19), 7325-7342.
- Velasco, E., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., & Lamb, B. (2005). Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment*, 39(38), 7433-7446.
- Wang, Z.H., Zhao, X.X., Yang, J.C., & Song, J.Y. (2016). Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. *Appl. Energy* 161,437–444. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.047>.
- Wang, X., Wang, X., Su, Y., & Zhang, H. (2019). Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Sci. Total Environ.* 653, 120–130. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.281
- Wang, V., Gao, J., & Luitgard, S. (2020). Assessing changes of urban vegetation cover and aboveground carbon stocks using LiDAR and Landsat imagery data in Auckland, New Zealand. *Int. J. Remote Sens.* 41, 2140–2158. doi:10.1080/01431161.2019.1685716
- Wang, Z. (2010). Research on vegetation quantity and carbon-fixing and oxygen-releasing effects of Fuzhou botanical garden. *Chin. Landsc. Archit.* doi:10.3969/j.issn. 1000-6664.2010.12.001
- Weissert, L. F., Salmond, J. A., & Schwendenmann, L. (2017). Photosynthetic CO₂ uptake and carbon sequestration potential of deciduous and evergreen tree species in an urban environment. *Urban Ecosystems*, 20, 663-674.



- Wilson, P. A., Norris, R. D., & Cooper, M. J. (2002). Testing the Cretaceous greenhouse hypothesis using glassy foraminiferal calcite from the core of the Turonian tropics on Demerara Rise. *Geology*, 30(7), 607-610.
- World Resources Institute,(2014): CAIT Climate Data Explorer.
- Wu, J., Long, J., Liu, H., Sun, G., Li, J., Xu, L., & Xu, C.(2021). Biogenic Volatile Organic Compounds from 14 Landscape Woody Species: Tree Species Selection in the Construction of Urban Greenspace with Forest Healthcare Effects. *Journal of Environmental Management* 300: 113761. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113761
- Xu, Y., & Cui, G. (2021). Influence of Spectral Characteristics of the Earth's Surface Radiation on the Greenhouse Effect: Principles and Mechanisms. *Atmospheric Environment* 244: 117908. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117908
- Xueref-Remy, I., Dieudonné, E., Vuillemin, C., Lopez, M., Lac, C., Schmidt, M., Delmotte M., Chevallier F., Ravetta F., Perrussel O., Ciais P., Bréon F.M., Broquet G., Ramonet M., Spain T. Gerard & Ampe, C. (2018). Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO₂ in the Paris megacity area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(5), 3335-3362.
- Yang, Z. (1996). Among-site rate variation and its impact on phylogenetic analyses. *Trends in ecology & evolution*, 11(9), 367-372.
- Zhang, X., Bi, J., Zhu, D., & Meng, Z. (2024). Seasonal variation of net ecosystem carbon exchange and gross primary production over a Loess Plateau semi-arid grassland of northwest China. *Scientific Reports*, 14(1), 2916.
- Zhang, L., Wang, Y., Miao, X., Gan, M., & Li, X. (2019). Geochemistry in geologic CO₂ utilization and storage: A brief review. *Advances in Geo-Energy Research*, 3(3), 304-313.
- Zhao, Y., Adiyeri Saseendran, D. P., Huang, C., Triana, C. A., Marks, W. R., Chen, H., Zhao H., & Patzke, G. R. (2023). Oxygen evolution/reduction reaction catalysts: from in situ monitoring and reaction mechanisms to rational design. *Chemical Reviews*, 123(9), 6257-6358.



Zhu, N., Yang, B., & Dong, Z. (2024). The explicit model of forest carbon storage based on remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* 53, 36. doi:10.11947/j. AGCS.2024.20230089