ESTIMACIÓN Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE CO_2 MEDIANTE EL SOFTWARE I-TREE EN AGROECOSISTEMAS CAFETALEROS DE VERACRUZ, MÉXICO †

[ESTIMATION AND ECONOMIC VALUATION OF CO_2 USING THE SOFTWARE I-TREE IN COFFEE AGROECOSYSTEMS IN VERACRUZ, MEXICO]

Lorena Patricia Sánchez-Morales and Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez*

El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto #26 Col. Centro. Xalapa, Ver., México.
*Email: lorena.samadhi@gmail.com, dra.valdes.colver@gmail.com**
**Corresponding author*

SUMMARY

Background: Coffee plantations under shade contribute significantly to carbon storage and sequestration because they can capture CO_2, reducing its presence in the air; however, there are few estimates of their potential and economic value. **Objective**: To determine the species used as shade trees and estimate the storage and sequestration of aerial carbon, as well as the economic value of carbon capture in three coffee plantations in Coatepec, Veracruz, México with a total area of 4 ha using the i-tree software. **Methodology:** A census of shade trees was carried out in 6 plots of 20 x 20 m in the three sites. The species, diameter at breast height (DBH), crown diameter in two directions: north-south and east-west, height of the live crown and the height of the crown base. crown percentage, dieback percentage, and crown light exposure. The census data was recorded in a Microsoft Excel 2019 spreadsheet and subsequently exported to the i-Tree ECO v6 software. **Results:** One hundred two trees corresponding to 17 families and 20 species were recorded, of which the most abundant were in site 1 *Inga vera* (57 %), in site 2 *Alchornea latifolia* (21 %), and in site 3 *Pinus chiapensis* (28 %). The estimated carbon stored for the three sites was 1,215.21 t CO_2e, and the annual sequestration was 63.01 t CO_2e. The carbon stored in the three coffee plantations has an estimated economic value of $394 940 MXN, and the sequestered carbon has a value of $19 695 MXN. **Implications:** In the long term, carbon capture could provide significant monetary value if a proposal is developed for carbon sales or programs for the payment of environmental services in the coffee plantations of Coatepec, Veracruz. **Conclusions:** This study contributed to determining the diversity of shade trees for carbon capture and demonstrating their monetary value as a strategy for conserving the tree canopy.
Key words: coffee; tree inventory; farmers; carbon sequestration; agroforestry systems; tree valuation.

RESUMEN

Antecedentes: Los cafetales bajo sombra contribuyen al almacenamiento y secuestro de carbono porque tienen la capacidad de captar CO_2 reduciendo su presencia en la atmósfera; sin embargo, existen pocas estimaciones sobre su potencial, así como de su valor económico. **Objetivo:** Determinar las especies usadas como árboles de sombra y estimar el almacenamiento y secuestro de carbono aéreo, así como el valor económico por la captura de carbono en tres cafetales de Coatepec, Veracruz, con un área total de 4 ha mediante el software *i-Tree*. **Metodología:** Se realizó un censo de árboles de sombra en 6 parcelas de 20 x 20 m en los tres sitios. Se registró la especie, el diámetro a la altura del pecho (DAP), el diámetro de la copa en dos direcciones: norte-sur y este-oeste, la altura, la altura de la copa viva y de la base de la copa, el porcentaje de copa, el porcentaje de muerte regresiva y la exposición a la luz de la copa. Los datos del censo se registraron en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel 2019 y posteriormente, se exportaron al software *i-Tree* ECO v6. **Resultados:** Se registraron 102 árboles correspondientes a 17 familias y 20 especies, de las cuales las más abundantes fueron: en el sitio 1 *Inga vera* (57 %), en el sitio 2 *Alchornea latifolia* (21 %) y en el sitio 3 *Pinus chiapensis* (28 %). La estimación de carbono almacenado para los tres sitios fue de 1 215.21 t CO_2e y el secuestro anual fue de 63.01 t CO_2e. El carbono almacenado en los tres cafetales tiene un valor económico estimado de $394 940 MXN y el carbono secuestrado un valor de $19 695 MXN. **Implicaciones:** A largo plazo, la captura de carbono podría proporcionar valores monetarios significativos si se desarrollara una propuesta para la venta de carbono o programas por el pago de servicios ambientales en los cafetales de Coatepec, Veracruz. **Conclusiones:**

† *Submitted November 18, 2024 – Accepted February 12, 2025.* http://doi.org/10.56369/tsaes.6010

Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
ISSN: 1870-0462.
ORCID = L.P. Sánchez-Morales: https://orcid.org/0009-0004-3159-4259; **O.A. Valdés-Rodríguez**: https://orcid.org/0000-0002-3702-6920

Este estudio contribuyó a determinar la diversidad de árboles de sombra para la captura de carbono y evidenciar su valor monetario como una estrategia para la conservación del dosel arbóreo.
Palabras clave: café; inventario arbóreo; productores; secuestro de carbono; sistemas agroforestales; valoración del arbolado.

INTRODUCCIÓN

El café es uno de los tres cultivos principales en el estado de Veracruz, México, dada su extensión (después de la caña de azúcar y el maíz) con aproximadamente 142,951 ha cultivadas (SIAP, 2023). De acuerdo a Hernández *et al.* (2011), los cafetales imitan la estructura del bosque natural y según Manson *et al.* (2008), pueden ofrecer servicios ecosistémicos similares a los de los bosques primarios, tales como la conservación de hasta el 89 % de la biodiversidad del bosque de niebla, la regulación del clima regional (Barradas *et al.*, 2010) y la captura de carbono (Pineda *et al.*, 2005).

El carbono absorbido a través de la fotosíntesis se almacena en la biomasa y el suelo de los bosques (CONAFOR, 2023). La biomasa ha sido el principal almacén de carbono estudiado hasta ahora en el Bosque mesófilo de montaña (Spracklen y Righelato, 2016). Los cafetales, por su afinidad con estos, pueden capturar cantidades cercanas de carbono. Esto se ha corroborado a través de diversos estudios, tal es el caso de Ávila *et al.* (2001), quienes estudiaron el almacenamiento de carbono en cuatro sistemas agroforestales en Costa Rica. Estos autores reportaron para el sistema café–*Erytrina poeppigiana* de 10 años un total de 195 t ha^{-1}; seguido del café-*Eucalyptus deglupt* de ocho años con 169 t ha^{-1}; *Brachiaria brizantha*-*Acacia mangium* de tres años, 96 t ha^{-1}; y *B. brizantha*-*E. deglupta* de tres años, 95 t ha^{-1}. Concluyeron que la cantidad de carbono almacenado en cada sistema depende del clima, de las condiciones edáficas y del manejo que se brinde al sistema. Del mismo modo, Espinoza *et al.* (2012) estimaron el carbono capturado en los árboles de sombra de cafetales en el municipio de Huatusco en Veracruz, México, concluyendo que estos almacenan en promedio 110 t ha^{-1} en un periodo que comprende entre 5 y 20 años. Soto y Aguirre (2015) estimaron el secuestro de carbono en 3 sistemas agroforestales: el policultivo de café orgánico, el policultivo de café no orgánico y café de sombra con el género *Inga* spp., almacenando 37.9, 34.1 y 27.3 t ha^{-1}, respectivamente, en biomasa arbórea (solo árboles ≥ 0.1 m de diámetro a la altura del pecho-DAP). Por su parte, Valdés *et al.* (2022) reportaron para Huatusco, Veracruz, 245.08 t ha^{-1} de carbono capturado durante 32 años en sistemas agroforestales basados en el cultivo del café.

Para estimar el carbono contenido en la biomasa aérea y generar ecuaciones alométricas, diversos autores como Acosta *et al.* (2002); Díaz *et al.* (2007) y Avendaño *et al.* (2009) utilizaron métodos destructivos en sus investigaciones. Derivado de estos métodos, actualmente ya se cuenta con ecuaciones alométricas que permiten estimar carbono sin destruir el arbolado, como lo muestran Díaz *et. al*. (2016) y Tafur *et. al*., (2022), asimismo, se han creado programas especializados como *i-Tree* (Cowett, 2014). Este software fue desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América y fue adaptado para su uso en México (USDA, 2018). El programa proporciona herramientas de análisis forestal urbano y rural para cuantificar el reservorio y captura de carbono, así como los beneficios ambientales que proporcionan los árboles y su valoración económica, dependiendo del tipo de clima y la ubicación de los sitios. Entre otras cosas, el software permite categorizar los usos de suelo en las parcelas de muestreo, y de este modo, hacer ajustes en el modelo basado en las diferencias de crecimiento de los individuos. Por ejemplo, un árbol situado en un parque crecerá a una tasa diferente que un árbol similar que está ubicado dentro de terreno de uso agrícola (USDA, 2018). Así, con evidencias sobre la cantidad de carbono capturado, es posible acceder a estímulos económicos, como los que ofrece el mercado de los bonos de carbono. Este mercado es un mecanismo internacional creado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El sistema ofrece incentivos económicos a las empresas que contribuyan a la mejora de la calidad ambiental, y funciona a través de la compra de bonos a países o empresas menos contaminantes. Existen dos tipos de mercados de carbono: El primero es el mercado regulado bajo el marco del Protocolo de Kioto y el segundo es el mercado voluntario, que no se encuentra regulado e incluye una amplia variedad de relaciones comerciales y estándares voluntarios (Valderrama, *et.al*, 2019).

De esta manera, la estimación del carbono en los árboles de sombra de los cafetales y su valoración económica es un incentivo atractivo para la conservación de estos sitios y para la mejora de los medios de vida de los productores. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las especies usadas como árboles de sombra, medir el almacenamiento y secuestro de carbono aéreo y estimar su valor económico en tres cafetales mediante el programa *i-tree.* La investigación se realizó en el muncipio de Coatepec, Veracruz, México, el cuál es uno de los cien municipios con mayor producción de granos de café en la zona (SIAP, 2023) y fue una de las primeras regiones de México en donde se introdujo la planta de *Coffea arabica* L. Así, la economía del municipio se ha desarrollado y ha girado alrededor de la agricultura

comercial, como el café, la caña de azúcar, el mango y el limón (Ejea, 2009). De estos, el café y sus derivados son uno de los productos con mayor valor de exportación con 3.27 millones de dólares) (Ayuntamiento de Coatepec, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Coatepec se ubica entre los 19° 21’ y 19° 32’ de latitud norte; los meridianos 96° 47’ y 97° 06’ de longitud oeste; tiene una altitud desde 500 a 2 900 msnm. Posee diferentes tipos de clima: semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, semicálido húmedo con lluvias todo el año, templado húmedo con lluvias todo el año, cálido subhúmedo con lluvias en verano y semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano (SIEGVER, 2023). La temperatura media anual es de 19 °C y la precipitación promedio anual acumulada de 1 854 mm.

La presente investigación se desarrolló en tres agroecosistemas cafetaleros, cuyas características se muestran en la tabla 1.

La tabla 1 muestra la ubicación de las tres localidades en donde se ubican los sitios elegidos: (1) La Laguna se ubica en las coordenadas 19°48'24" N y 96°93'39" O, a una altitud de 1 240 msnm con una población total de 1 046 personas; (2) Pacho Viejo se encuentra en las coordenadas 19°48'08" N y 96°91'69" O, a 1 200 msnm con una población total de 4 829 habitantes; y (3) Cinco Palos se encuentra ubicado en las coordenadas 19°50'66" N y 96°99'58" O, a una altura de 1 520 msnm con una población total de 586 habitantes.

Tabla 1. Características de los sitios seleccionados para realizar la investigación en Coatepec, Veracruz, México.

Características	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Nombre del predio	“La capilla”	“Campo deportivo”	“El volador”
Superficie	0.50 ha	0.50 ha	3 ha
Ubicación	Localidad La Laguna	Localidad Pacho Viejo	Localidad Cinco Palos
Años de establecimiento del cafeal	12 Años	15 años	8 años

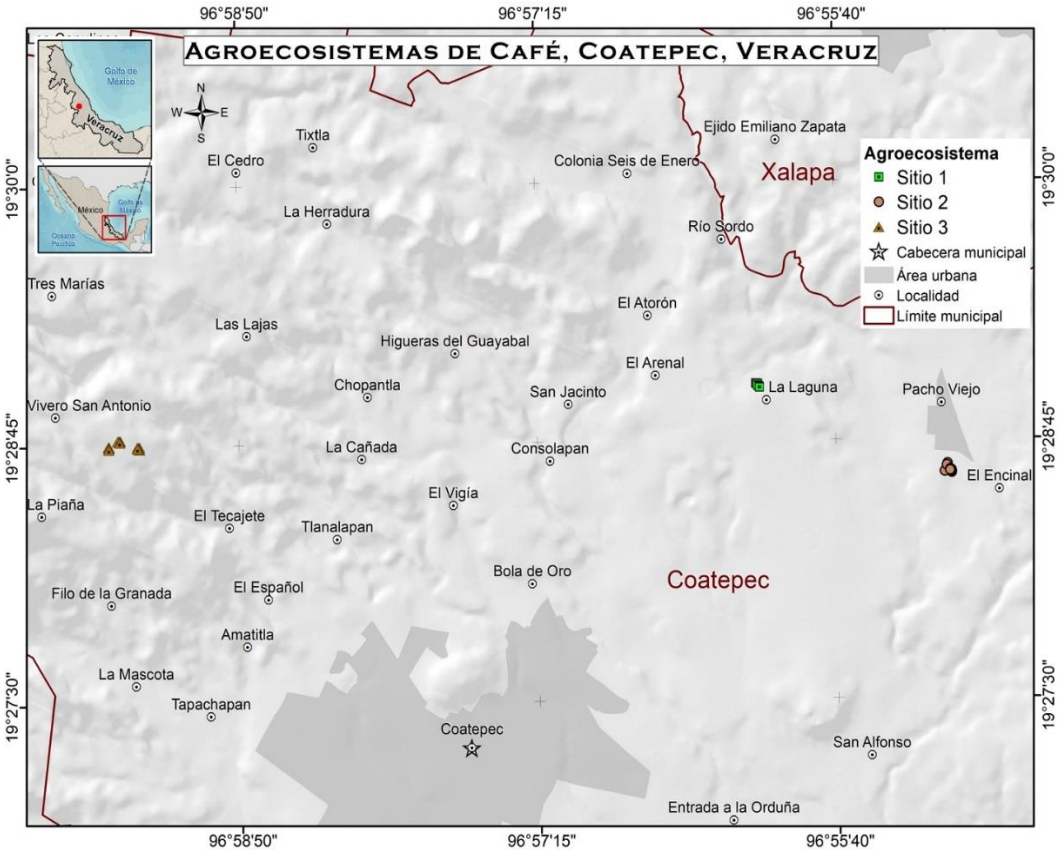

Figura 1. Ubicación de los tres sitios seleccionados en el municipio Coatepec, Veracruz, México. Fuente: Elaborado por el LG. José Isidro Marín Mendoza.

Aspectos metodológicos

La investigación se llevó a cabo en 3 fases:

Fase 1: Selección de los sitios. Los sitios se seleccionaron con base en su ubicación dentro del municipio Coatepec, años del establecimiento del cafetal bajo sombra (entre 8 y 15 años), fácil acceso y la disposición de los propietarios para participar en la investigación. Cabe mencionar que las plantaciones de café establecidas en los tres sitios fueron realizadas cuando los árboles de sombra estaban en crecimiento y en algunos casos fueron introducidos y sembrados por los propietarios.

Fase 2: Muestreo. Se cuadriculó el área total de cada cafetal en un mapa, y con una calculadora se generaron números al azar seleccionando aleatoriamente 2 sitios dentro de la cuadrícula. Se marcó un total de 6 cuadrantes de 20×20 m en los tres sitios. Posteriormente se realizó un censo de los árboles de sombra y se realizaron las mediciones de acuerdo al manual de toma de datos de *i-Tree* ECO v6 (USDA, 2018). El criterio para la selección de individuos se basó en árboles con más de 5 cm de diámetro a la altura del pecho (*DAP)*. De esta manera se registraron los siguientes datos: la especie de cada árbol, el DAP y el diámetro de la copa en dos direcciones: norte-sur y este-oeste, con una cinta de tela de 5 m (Forestry Suppliers). Del mismo modo, se obtuvo la altura de cada árbol, la altura de la copa viva y de la base de la copa con una pistola *Haga GmbH+Co KG*® (modelo *Haga Altimeter*); y de acuerdo al manual de toma de datos *i-Tree* ECO v6 (USDA, 2018), el porcentaje de copa faltante (aquel que no está ocupado por ramas y hojas), el porcentaje de muerte regresiva (compuesto de ramas muertas) y la exposición a la luz de la copa (número de ramas del árbol que recibe la luz arriba de la copa). Estos parámetros indican la salud del árbol y, de acuerdo con estos, el sotfware clasifica en 22 clases los estados del individuo para realizar sus estimaciones.

Fase 3: Análisis de datos. Los datos del censo se registraron en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel 2019 y posteriormente, se exportaron al software *i-Tree* ECO v6. Para realizar los cálculos de almacenamiento de carbono el software calculó la biomasa de cada árbol usando ecuaciones de la literatura y los datos de los árboles medidos. Para calcular la cantidad bruta de carbono secuestrado anualmente, se añadió el crecimiento promedio del diámetro del género correspondiente, la clase diámetrica y la condición del árbol. Las estimaciones son basadas en ecuaciones para áreas tropicales secas y húmedas basadas en las investigaciones de Chave *et al.,* 2005 sobre alometría de árboles y los resultados obtenidos fueron extrapolados para 1 ha.

Para realizar la valoración económica, el sotware convierte el valor económico al tipo de cambio local con tasas definidas por el usuario. Para ello, se tomó en cuenta el precio promedio por tonelada de CO_2 ($t{\cdot}CO_2$) registrado por el World Bank (2024). Para México existe una diversidad de precios (de acuerdo a la entidad, que van desde los $45 MXN (como Guanajuato) hasta los $640 MXN (en entidades como Querétaro). Para el caso de Veracruz no existe un mecanismo desarrollado de impuesto al carbono, por lo cual se tomó como el referente el estado de Tamaulipas (por ser colindante) el cuál es de $325 MXN/tCO_2e en 2024.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Especies usadas como árboles de sombra

Se censaron 102 árboles, pertenecientes a 17 familias y 20 especies en los tres sitios. En la tabla 2 se muestran los individuos censados y sus variables dasométricas promedio.

De los tres cafetales, el sitio con mayor número de especies fue el 2 con doce especies, seguido del sitio 3 con nueve especies y por último el sitio 1 con cuatro especies. En el sitio 1, la especie más abundante fue *Inga vera* Kunth. (57 %), mientras que en el sitio 2 *Alchornea latifolia* Sw. (21 %), y en el sitio 3 *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen (28 %) (ver figura 2).

Cabe mencionar que las especies usadas en los tres cafetales son especies multipropósito y fueron seleccionadas por los productores en atención a los atributos económicos, ambientales y sociales que proveen. Por ejemplo, las especies del género *Inga* Mill son utilizadas por sus nódulos fijadores de nitrógeno en las raíces para nutrir el suelo. Otras como *Trema micrantha* (Lundell) Standl. & Steyerm., *Clethra mexicana* DC y especies del género *Quercus* L., son utilizadas por la leña que proveen. Por su valor alimenticio y económico, los productores utilizan especies como *Citrus* x *limon* (L.) Osbeck y *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche, y por sus características maderables, *Cedrela odorata* L. Estos datos coinciden con lo que sugieren Sánchez *et al.* (2017), quienes observaron que los productores de café del centro del estado de Veracruz prefieren diversificar sus parcelas con árboles maderables de especies introducidas o nativas de la región, principalmente para el consumo de leña, como cercos vivos y con fines alimenticios.

Tabla 2. Especies arbóreas censadas en tres sitios de Coatepec, Veracruz, México, con sus variables dasométricas promedio.

Núm.	Familia	Especie	Núm. de individuos	Variables				
				DAP (cm)	*AT* (m)	*AC*-N/S (m)	*AC*-E/O (m)	*AB* (m^2)
1	Agavaceae	*Yucca guatemalensis* Baker.	1	11.0	6.0	1	1	0.01021
2	Altingiaceae	*Liquidambar styraciflua* L.	8	17.3	11.6	6.8	7.0	0.02269
3	Burseraceae	*Bursera simaruba* (L.) Sarg.	1	29.2	12.0	8.0	8.0	0.06605
4	Cannabaceae	*Trema micrantha* (Lundell) Standl. & Steyerm.	7	22.6	12.7	5.8	5.7	0.04356
5	Clethraceae	*Clethra mexicana* DC.	4	33.0	14.0	6.5	6.2	0.08553
6	Euphorbiaceae	*Alchornea latifolia* Sw.	6	29.5	15.1	4.6	4.5	0.06605
7	Fabaceae	*Inga vera* Kunth.	8	19.8	9.0	9.7	7.8	0.02835
		Inga sp.	7	13.0	9.1	4.2	4.0	0.01327
8	Fagaceae	*Quercus insignis* M. Martens & Galeotti	1	22.3	10.0	7.0	7.0	0.03801
9	Fraxinaceae	*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.	5	33.8	17.0	9.2	9.2	0.08553
10	Juglandaceae	*Juglans pyriformis* Liebm.	11	24.3	18.3	7.8	11.4	0.04523
11	Meliaceae	*Cedrela odorata* L.	2	26.5	12.5	7.5	8.0	0.05309
		Trichilia havanensis Jacq.	1	16.0	8.0	6.0	5.0	0.05309
12	Moraceae	*Ficus cotinifolia* Kunth.	1	93.0	25.0	36.0	38.0	0.67929
13	Myrtaceae	*Syzygium jambos* Duthie	2	19.8	11.9	7.5	6.5	0.02835
14	Pinaceae	*Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen	17	12.4	12.4	3.3	3.7	0.01130
15	Proteaceae	*Grevillea robusta* A. Cunn. *ex* R. Br.	4	45.8	17.0	7.2	5.5	0.15904
		Macadamia integrifolia Maiden & Betche	12	18.6	8.2	8.5	7.4	0.02544
16	Rutaceae	*Citrus x limon* (L.) Osbeck	1	6.0	2.0	7.0	7.0	0.00282
17	Ulmaceae	*Ulmus mexicana* (Liebm.) Planch.	3	19.0	8.6	7.6	7.0	0.02835
Total/Promedio			102	25.6	14.0	8.0	7.9	

DAP = Diámetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total del árbol; *AC*-N/S = Ancho de copa de norte a sur; *AC*-E/O = Ancho de copa de este a oeste; AB= Área Basal.

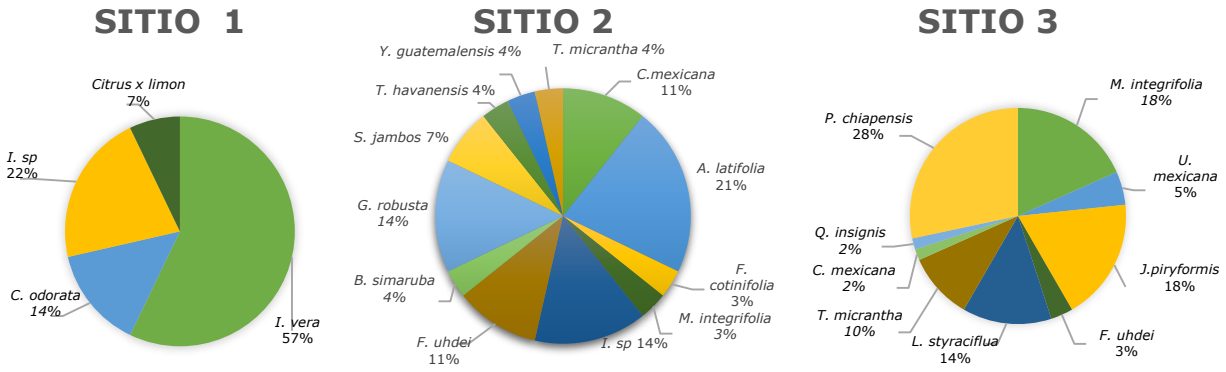

Figura 2. Especies usadas como árboles de sombra en tres sitios estudiados en Coatepec, Veracruz, México.

De la misma manera, algunas de las especies identificadas en este estudio coinciden con las que reporta Ortiz (2004) para los cafetales en la región de Xalapa-Coatepec, tales como: ixpepel (*Trema micrantha* (Lundell) Standl. & Steye) y nogal (*Juglans* sp.) y las que mencionan Sánchez *et al.* (2017) como grevilia (*Grevillia robusta* A. Cunn. *ex* R. Br.), ixpepel (*Trema micrantha*), cedro rojo (*Cedrela odorata*), vainillo (*Inga vera*) y pambacillo (*Alchornea latifolia*).

En lo que respecta a las variables dasométricas, la altura promedio de los individuos censados fue de 14 m, y el *DAP* promedio de 25.6 cm, por lo que se considera que la mayoría del arbolado fue de talla mediana; sin embargo, se registró un ejemplar con una altura superior a 25 m con un *DAP* de 93 cm, que corresponde a *Ficus cotinifolia* Kunth.

Como se observa en la figura 3, el 75 % del total de los árboles registró un diámetro entre 7.7 y 30.5 cm. Esto significa que una gran parte de los individuos presentes en los tres sitios son juveniles (75 %) y solo un 4.9 % son árboles de talla grande con un *DAP* superior a 45 cm.

Estimación del almacén y secuestro de carbono aéreo

Los resultados sobre la estimación del almacenamiento y secuestro de carbono aéreo en los árboles de sombra fueron muy variados (ver tabla 3). Se consideró como almacenamiento al carbono total capurado durante la vida del árbol y al secuestro al carbono capturado durante el crecimiento del individuo anualmente. Así, el cálculo del carbono total almacenado para los tres sitios fue de 1 215.21 t CO_2e y el secuestro anual fue de 63.01 t CO_2e.

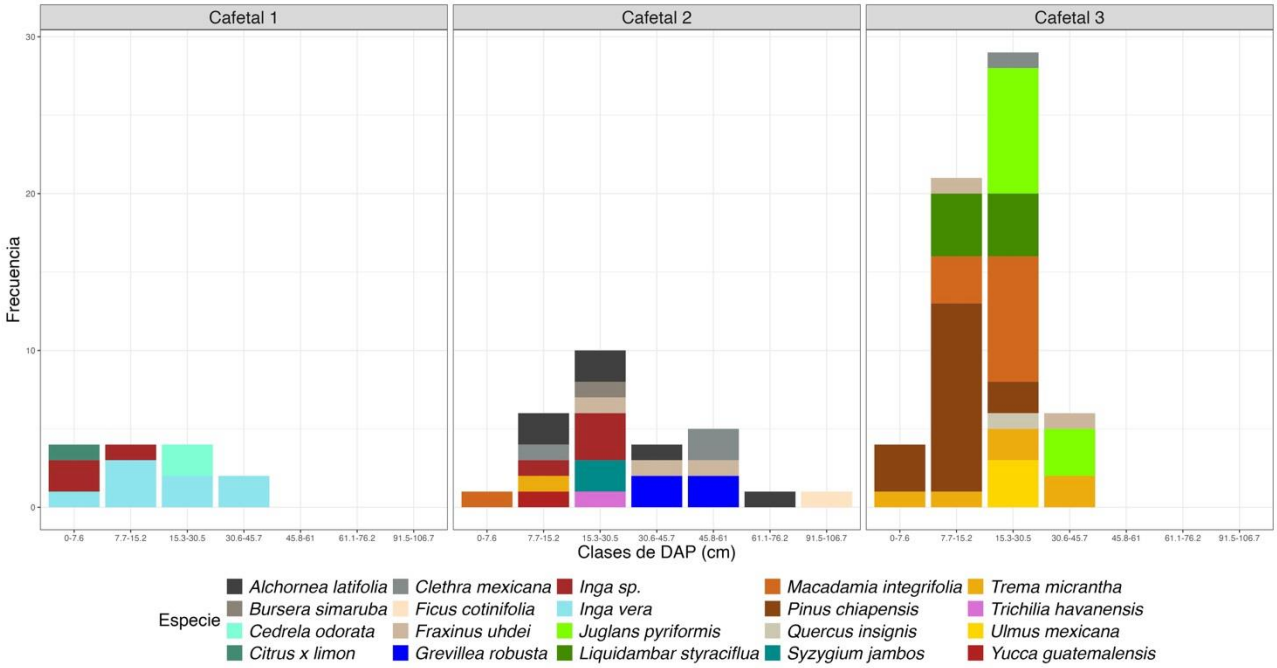

Figura 3. Categorías diamétricas de los árboles censados en los tres cafetales estudiados en Coatepec, Veracruz, México. Fuente: Elaborado por el Mtro. José Martín Barreda Castillo

Tabla 3. Carbono almacenado y secuestrado en la biomasa aérea de tres sitios en Coatepec, Veracruz, México.

Sitio	Densidad (áboles ha^{-1})	Almacén de carbono (t ha^{-1})	t CO_2e Almacén de carbono	Secuestro de carbono (t ha^{-1} $año^{-1}$)	t CO_2e Secuestro de carbono
1	140	55.00	201.85	4.37	16.03
2	182	172.75	633.99	4.7	14.85
3	500	103.37	379.36	8.1	29.72
Total		331.12	1 215.21	17.17	63.01

Es de notar que el sitio 3 registró una alta densidad de árboles, sin embargo, mostró menor valor de almacén de carbono en comparación con el sitio 2. Esto es debido a que los árboles censados pertenecían a tallas diamétricas pequeñas, es decir, individuos juveniles, los cuales se encontraban en un periodo activo de crecimiento. En contraparte, en el sitio 2 se encontraron árboles de porte grande, que de acuerdo con Saavedra *et al.* (2019) proveen mayores beneficios ecosistémicos, como el almacén de carbono. Esto se puede corroborar con el estudio de López *et al.* (2018), quienes registraron depósitos de carbono superiores en sitios donde los árboles pertenecían a categorías diamétricas grandes.

Los valores de almacén y secuestro de carbono registrados en esta investigación se encuentran dentro de los rangos reportados por Ortiz (2004), quien estimó 65 t ha^{-1}, y los reportados por Espinoza *et al.* (2012) en la zona central del estado de Veracruz, con 110 t ha^{-1}. Los valores reportados por Valdés *et al.* (2022) superan los estimados en este trabajo con 245.08 t ha^{-1}. Cabe resaltar que estos últimos autores incluyeron, además de la biomasa aérea, el mantillo y la materia edáfica en diferentes profundidades de suelo. Sin embargo, la biomasa aérea representa el 68 % del total del carbono almacenado.

En relación a la variabilidad de los resultados en el almacén y secuestro de carbono, Montagnini y Nair (2004) sugieren que las cantidades de carbono dependen de la proporción de árboles presentes y del tamaño del árbol, así como también pueden obedecer al uso de metodologías diferentes para su medición.

Estimación del valor económico del almacenamiento y secuestro de carbono de los árboles de sombra

La valoración de los beneficios cuantificados con el programa *i-Tree* equivalen a $394 940 MXN, de los cuales $19 695 MXN se generan anualmente en los tres cafetales con una superficie total de 4 ha. Los detalles del valor económico por especie se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Valoración económica del almacén y secuestro de carbono de las especies censadas por ha en los tres sitios estudiados en Coatepec, Veracruz, México.

Núm Fam	Especie	Núm. de individuos	Almacenamiento de carbono			Secuestro de carbono		
			Tonelada métrica	tCO_2e	$ MEX	Tonelada métrica $año^{-1}$	tCO_2e	$ MEX
1	*Yucca guatemalensis* Baker.*	1	0	0	0	0	0	0
2	*Liquidambar styraciflua* L.	8	0.35	1.28	416	0.04	0.14	45.5
3	*Bursera simaruba* (L.) Sarg.	1	0.20	0.73	238.55	0.02	0.07	22.75
4	*Trema micrantha* (Lundell) Standl. & Steyerm	7	0.82	3	975	0.02	0.07	22.75
5	*Clethra mexicana* DC.	4	3.65	13.39	4,351.75	0.06	0.22	71.5
6	*Alchornea latifolia* Sw.	6	3.0	11.01	975	0.05	0.18	58.5
7	*Inga vera* Kunth.	8	3.9	14.31	4,650.75	0.30	1.10	357.5
	Inga sp.	7	0	0	0	0.04	0.14	45.5
8	*Quercus insignis* M. Martens & Galeotti	1	0.19	0.69	224.25	0.02	0.07	22.75
9	*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.	5	1.59	5.83	1,894.75	0.02	0.07	22.75
10	*Juglans pyriformis* Liebm.	11	1.88	6.89	2,239.25	0.20	0.73	237.25
11	*Cedrela odorata* L.	2	0.40	1.46	474.50	0.03	0.11	35.75
	Trichilia havanensis Jacq.	1	0.10	0.36	117	0.01	0.03	9.75
12	*Ficus cotinifolia* Kunth.	1	3.80	13.94	4,530.50	0	0	0
13	*Syzygium jambos* Duthie	2	0.30	1.10	357.50	0.02	0.07	22.75
14	*Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen	17	0.46	1.68	546	0.04	0.14	45.5
15	*Grevillea robusta* A. Cunn. *ex* R. Br.	4	2.4	8.80	2,860	0.19	0.69	224.25
	Macadamia integrifolia Maiden & Betche	12	3.16	11.59	3,766.75	0.15	0.55	178.75
16	*Citrus x limon* (L.) Osbeck	1	0.10	0.36	117	0.01	0.03	9.75
17	*Ulmus mexicana* (Liebm.) Planch.	3	0.26	0.95	308.75	0.03	0.11	35.75
	Total	102	26.56	97.37	31,645.25	1.52	4.52	1,469

* *Yucca guatemalensis* Baker: debido a su talla diamétrica pequeña y su lento crecimiento el software i-Tree no arrojó valores sobre el almacén y secuestro de carbono

La especie con mayor valor económico fue *Inga vera*, seguida de *Ficus cotinifolia* Kunth y *Clethra mexicana*, con valores superiores a los 4 mil pesos mexicanos.

En el primer caso (*Inga vera*), su valor económico se debe al número de individuos registrados (8); en el segundo caso (*Ficus cotinifolia*) obedece principalmente a la talla diamétrica de un único árbol, el cual superó los 93 cm; y para la tercera especie (*Clethra mexicana*) se debe al número de individuos en combinación con su diámetro.

A nivel de finca, el sitio con mayor valor económico en relación al carbono almacenado y secuestrado es el 2, seguido del sitio 1, y por último el sitio 3, como se puede apreciar en la figura 4. Los resultados obtenidos sobre la valoración económica de los árboles en este estudio están en congruencia con los años del establecimiento del cafetal y por consiguiente con la talla diamétrica de los árboles. Así, el sitio 2 con una antigüedad de 15 años, fue el sitio que registró las tallas diamétricas más grandes (5 a 93 cm). En contraparte, el sitio 3 con una antigüedad de 8 años, registró tallas diamétricas de 6 a 40.9 cm, por lo que su valoración económica resultó baja.

Los resultados obtenidos en este estudio son superiores a los obtenidos por Martínez *et al.* (2021), quienes obtuvieron un valor total de $51 788.63 MXN por el almacén y $1 971.73 MXN por el secuestro anual de carbono en 4 parques urbanos en la Ciudad de Texcoco, Estado de México, con una superficie total de 2.3 ha. Esto puede atribuirse a las tallas diamétricas registradas en este estudio.

Por otro lado, el valor económico de los servicios ambientales en los cafetales resulta de vital importancia si consideramos que en los últimos años, su desempeño ha sido deficiente en términos de producción (Muñoz *et al.* 2019). En México, este sector ha registrado una caída acumulada constante y, de ser el tercer productor de café en el mundo en 1990, actualmente ocupa el décimo primer lugar a nivel global (SIAP, 2023). Debido a esto, la cafeticultura se ha convertido en una actividad de subsistencia para los pequeños y medianos productores (Pineda *et al.*, 2005). De tal modo, el pago por servicios ambientales resulta una alternativa para conservar el arbolado y sus servicios, y de la misma manera, incrementar los ingresos del agricultor. Esto resultaría de gran interés para algunos cafeticultores, lo cual se puede constatar en el estudio realizado por Ruelas *et al.* (2014) en la localidad de la Orduña, municipio Coatepec, Veracruz, en donde el 80 % de los productores entrevistados expresaron que mantendrían sus cafetales en caso de que se les otorgaran pagos para incentivar la producción y conservación.

En este sentido, los programas por el pago de servicios ambientales constituyen importantes mecanismos para tratar de remediar el daño ambiental por emisiones de CO_2. En el caso del municipio Coatepec, se está llevando a cabo una iniciativa a través del organismo FIDECOAGUA (Fideicomiso público encargado de gestionar y aplicar recurso público y privado para el pago de servicios ambientales en el municipio Coatepec, Veracruz), quien se encarga de beneficiar a los propietarios con $1 000 MXN anuales por hectárea de bosque mesófilo de montaña conservado. Así, los

Figura 4. Valoración económica del almacén y secuestro de carbono en tres cafetales de Coatepec, Veracruz, México. Fuente: Elaboración Propia.

servicios ambientales están siendo considerados en el ámbito normativo y, actualmente, en Coatepec se están implementando estrategias para mantenerlos. Del tal modo, la estimación de la captura de carbono en las fincas cafetaleras podría tomar mayor relevancia y en el futuro tendría impactos importantes en la economía de los productores de la región si se llegara a desarrollar una propuesta para la venta de carbono a partir de los cafetales de Coatepec, Veracruz, México.

CONCLUSIONES

Las especies usadas como árboles de sombra en tres cafetales en Coatepec, Veracruz corresponden a 20 especies pertenecientes a 17 familias de las cuales las más abundantes fueron: *Inga vera*, *Alchornea latifolia* y *Pinus chiapensis*. La estimación de almacenacimiento de carbono por ha en los tres sitios fue de 1 215.21 t CO_2e y el secuestro anual fue de 63.01 t CO_2e. Se estimó que el carbono almacenado tiene un potencial económico de $394 940 MXN, de los cuales $19 695 MXN se genera por el secuestro anual en los tres cafetales. El software *i-Tree* ECO v6 fue una herramienta últil para la estimación del carbono en los cafetales generando valores dentro de rangos similares a otras investigaciones. Este estudio aportó información relevante en relación a las especies de árboles usadas por los productores de café, ya que las estimaciones generadas pueden ser la base para el desarrollo de propuestas que permitan adherirse al mercado de carbono y para que los programas por el pago de servicios ambientales existentes en Coatepec, tengan fundamentos para identificar a los propietarios que revierten el daño ambiental a través de los servicios que generan sus tierras.

Agradecimientos
Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada para realizar el Posdoctorado y realizar esta investigación. Del mismo modo, al Mtro. Esteban Francisco Ventura y a la Biol. Jazmín Contreras por el acompañamiento en la toma de datos y al Mtro. José Martín Barreda Castillo por su participación en la elaboración de las gráficas

Funding. No support was received for this study.

Conflict of interest statement. The authors declare that there is not conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. Data is available upon reasonable request with the corresponding author (ovaldes@colver.info).

Author contribution statement (CRediT). L.P. Sánchez-Morales: Conceptualization, Formal analysis, Methodology, Visualization, Writing – original draft, **O.A. Valdés-Rodríguez**: Supervision, Validation, Writing – review & editing.

REFERENCIAS

Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández J, Velázquez-Martínez, A. and Etchevers-Barra, J.D., 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia,* 36(6), pp. 725-736. https://www.redalyc.org/pdf/302/30236610.pdf

Avendaño-Hernández, D.M., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., and Etchevers-Barra, J.D., 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana,* 32(3), pp. 233-238. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011

Ayuntamiento de Coatepec. 2023. *Coatepec, municipio de Veracruz, Ignacio de la Llave*. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/coatepec-30038 (22 de abril de 2024).

Barradas V.L., Cervantes-Pérez, J., Ramos-Palacios, R., Puchet-Anyul, P., Vázquez-Rodríguez, P., and Granados-Ramírez, R., 2010. Meso-scale climate change in the central mountain region of Veracruz State, Mexico. *In*: Bruijnzeel, L. A., F. N. Scatena y L. S. Hamilton (eds). Tropical Montane Cloud Forests. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 549-556.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H.,Puig, H., Riéra B., and Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, pp. 87-99. http://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x

Climate Trade, 2013. Your carbon credit market. https://market.climatetrade.com/carbon-footprint-calculator

CONAFOR, 2023. ¿Cuánto carbono secuestran los ecosistemas forestales? https://www.gob.mx/conafor/articulos/cuanto-carbono-secuestran-los-ecosistemas-forestales

Cowett, F., 2014. Methodology for spatial analysis of municipal street tree benefits. *Arboriculture & Urban Forestry,* 40(2), pp.112-118.

Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E. and Etchevers-Barra J. D., 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. *et* Cham. *Madera y Bosques,* 13(1), pp. 25-34. https://www.redalyc.org/pdf/617/61713103.pdf

Díaz-Ríos, M.D., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Sánchez-Vélez, A., Lara-Bueno, A. and Cruz-León A., 2016. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 16, pp. 3235-3249.

Ejea-Mendoza, M.T., 2009. Café y cultura productiva en una región de Veracruz. *Nueva Antropología XXII,* (70), pp 33-56. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15911921003

Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A. and Torres-Rivera, A., 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente,* 18(1), pp. 57-70. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030

Hernández-Solabac, J.A.M., Nava-Tablada, M.E., Díaz-Cárdenas S., Pérez-Portilla E. and Escamilla-Prado, E., 2011. Migración internacional y manejo tecnológico del café en dos comunidades del centro de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems,* 14(3), pp. 807-818. http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.800

López-López, S.F., Martínez-Trinidad, T., Benavides-Meza, H.M., García-Nieto, M. and Ángeles-Pérez, G., 2018. Reservorios de biomasa y carbono en el arbolado de la primera sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México. *Madera y Bosques,* 24(3), pp. 1-14. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431620

Manson, R.H., Hernández-Ortiz, V., Gallina, S. and Mehltreter, K. (Eds.), 2008. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología A. C. (INECOL) Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. 315 p.

Martínez-Trinidad, T., Hernández-López, P., López-López S.F. and Mohedano-Caballero, L., 2021. Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante *i-Tree Eco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 12(67), pp. 202-223. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880

Montagnini, F. and Nair, P.K.R., 2004. Carbon Sequestration: An Underexploited Environmental Benefit of Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems,* 61-62, pp. 281-295. https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79

Muñoz-Rodríguez, M., Gómez-Pérez D., Santoyo-Cortés, V.H. and Rosales-Lechuga, R., 2019. Los negocios del café ¿Cómo innovar en el contexto de la paradoja del café, en pro de una red de valor más inclusiva y accesible? Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. Ciudad de México. 247 p. https://ciestaam.edu.mx/libro/los-negocios-del-cafe/

Ortiz-Ceballos, G., 2004. El agroecosistema café: crisis de mercado y Sustentabilidad. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa en Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz. México. 125 p.

Pineda-López, Ma.R., Ortiz-Ceballos G., and Sánchez-Velázquez, L.R., 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques,* 11(2), pp. 3-14. https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v11n2/2448-7597-mb-11-02-3.pdf

Ruelas-Monjardín, L.C., Nava-Tablada, M.E., Cervantes, J. and Barradas V.L., 2014. Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques,* 20(3), pp. 27-40. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000300003&lng=es&tlng=es

Saavedra-Romero, L.-de-L., Hernández-de-la-R., P., Alvarado-Rosales D., Martínez-Trinidad, T. and Villa-Castillo, J., 2019. Diversidad, estructura arbórea e índice de valor de

importancia en un bosque urbano de la Ciudad de México. Polibotánica, 47, pp. 25-37. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682019000100025

Sánchez-Hernández, S., Mendoza-Briseño, M.A. and García-Hernández, R.V., 2017. Diversificación de la sombra tradicional de cafetales en Veracruz mediante especies maderables. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 8(40) pp. 7-17. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/32/76

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2023. Anuario Estadístico de la producción agrícola. Resumen nacional por cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (2 de abril de 2024).

SIEGVER, (Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz), 2023. Coatepec. Gobierno del Estado de Veracruz. http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Coatepec.CM_.Ver_.2023.2.pdf (12 de agosto de 2024).

Soto-Pinto, L. and Aguirre-Dávila, C., 2015. Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science, 7*(1), pp. 117–128. http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n1p117

Spracklen, D.V. and Righelato R., 2016. Carbon storage and sequestration of re-growing montane forests in southern Ecuador. *Forest Ecology and Management*, 364, pp.139-144. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.001

United States Department of Agriculture Forest Service (USDA). 2018. i-Tree Eco Field guide V6.0. https://www.itreetools.org/documents/274/EcoV6.FieldManual.2021.10.06.pdf (30 de julio de 2024).

Tafur, E., Veneros, J., García, L., Gamarra, Ó., Farje, J. and Santistevan, M., 2022. Técnicas no destructivas para la estimación de la biomasa forestal aérea. *Idesia (Arica)*, 40(3), pp. 7-17. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000300007

Valderrama-López, C.F., Castillo-Vargas, J. A., Torres-Romero, J.C., Guzmán-Lenis, A.R., Forero-Ausique, V.F., Duque-Chávez, C. M., Sepúlveda-Casadiego, Y. A., Montenegro-Gómez, S. P., 2019. *Capitulo 6 Secuestro y almacenamiento de carbono*. Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Repositorio Institucional UNAD.

Valdés-Velarde, E., Vázquez-Domínguez, L.P., Tinoco-Rueda, J.A., Sánchez-Hernández, R., Salcedo-Pérez, E. and Lagunes-Fortiz, E., 2022. Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), pp. 287-297. https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/3283/5160

World Bank, 2024. State and Trends of Carbon Pricing 2024. Washington, DC: World Bank. http://hdl.handle.net/10986/41544 (13 de agosto 2024).