

Carbon Capture



Reserva Forestal Protectora Planalto



Flora: 95 familias / 255 especies
Aves: Más de 210 especies entre migratorias y endémicas
Mamíferos no voladores: 13 familias / 26 especies
Mariposas: 274 especies
Murciélagos: 13 especies
Escarabajos coprófagos: 35 especies



BIODIVERSIDAD de PLANALTO



Reserva Forestal Protectora Planalto

Cenicafé
Centro Nacional de Investigaciones de Café

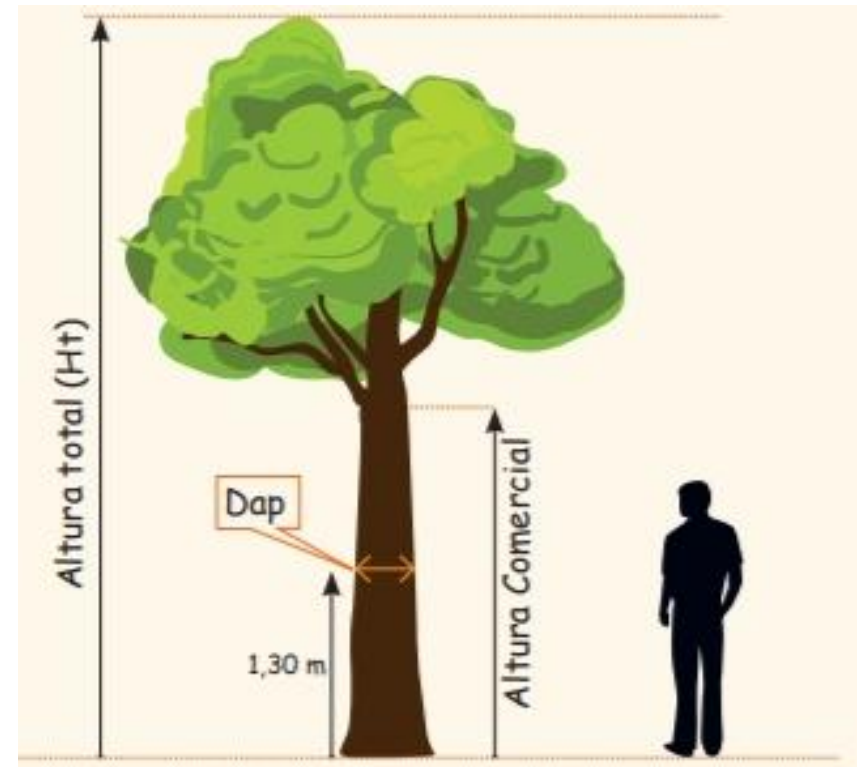


Determinación de la ecuación alométrica óptima para la estimación de carbono y su valoración económica en el bosque muy húmedo premontano-Reserva Forestal Protectora Planalto.

Diego Fernando Arango - Asistente de investigación economía

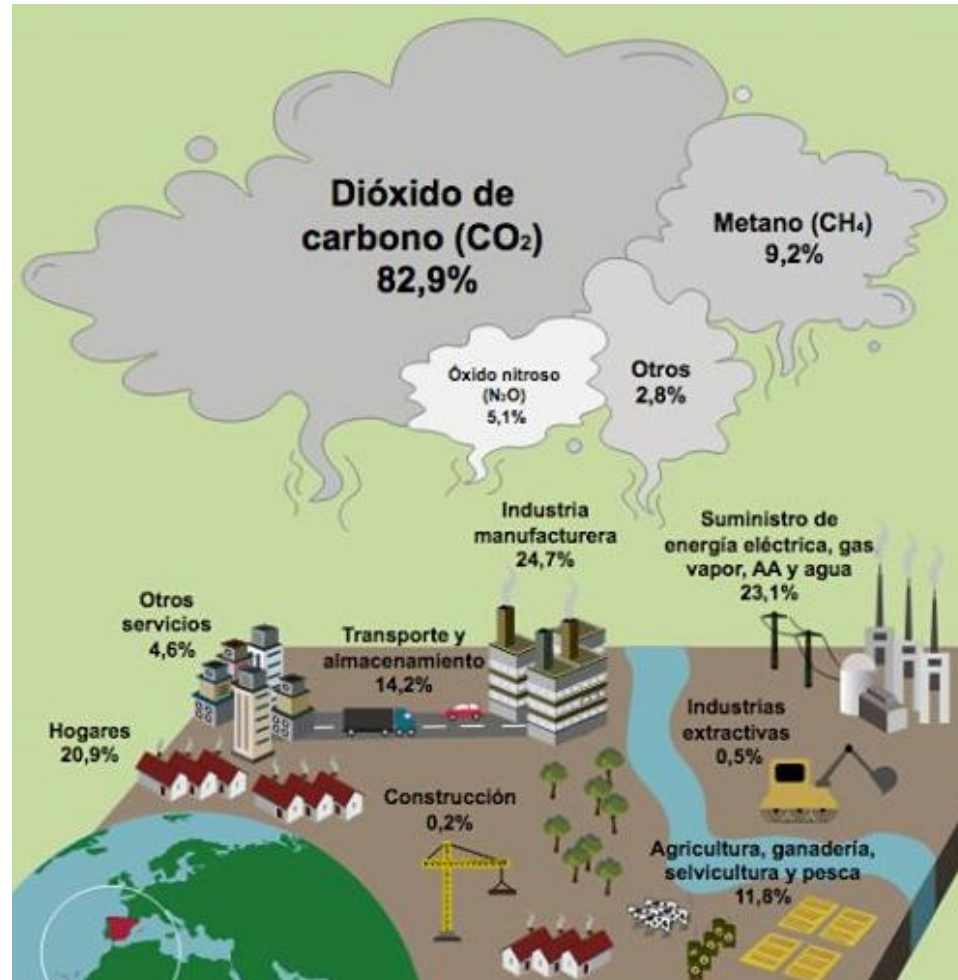
El término alométrico proviene del griego *allo* (otro) y *metron* (medida), y se refiere a la relación matemática entre el tamaño de una parte de un organismo y el tamaño total.

En el caso de los árboles, las ecuaciones alométricas permiten predecir la biomasa o el carbono almacenado usando variables dendrométricas fácilmente medibles como el DAP (diámetro a la altura del pecho), la altura y la densidad de la madera.



Fuente: (infoagronomo, 2021)

Cambio climático

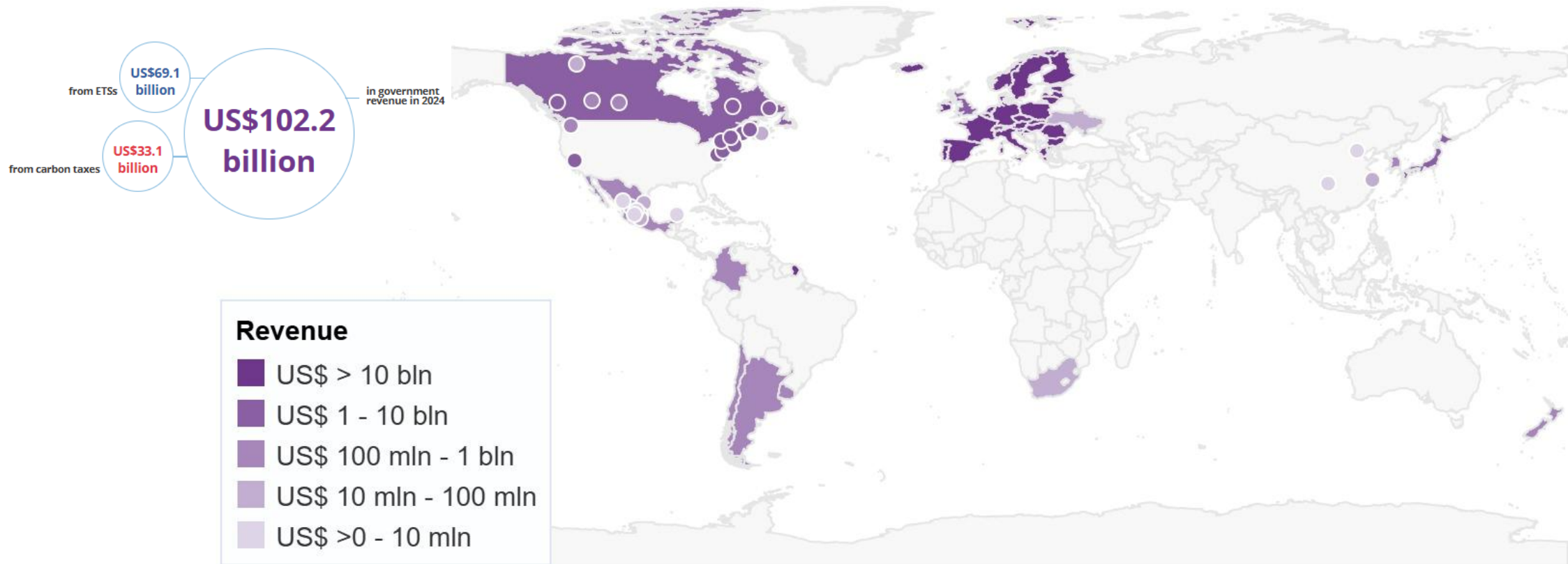


↗ Concentración GEI
↗ Temperatura global

Fuente: *Las emisiones de gases de efecto invernadero.* <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-20181122>

Government revenue from carbon pricing, 2024

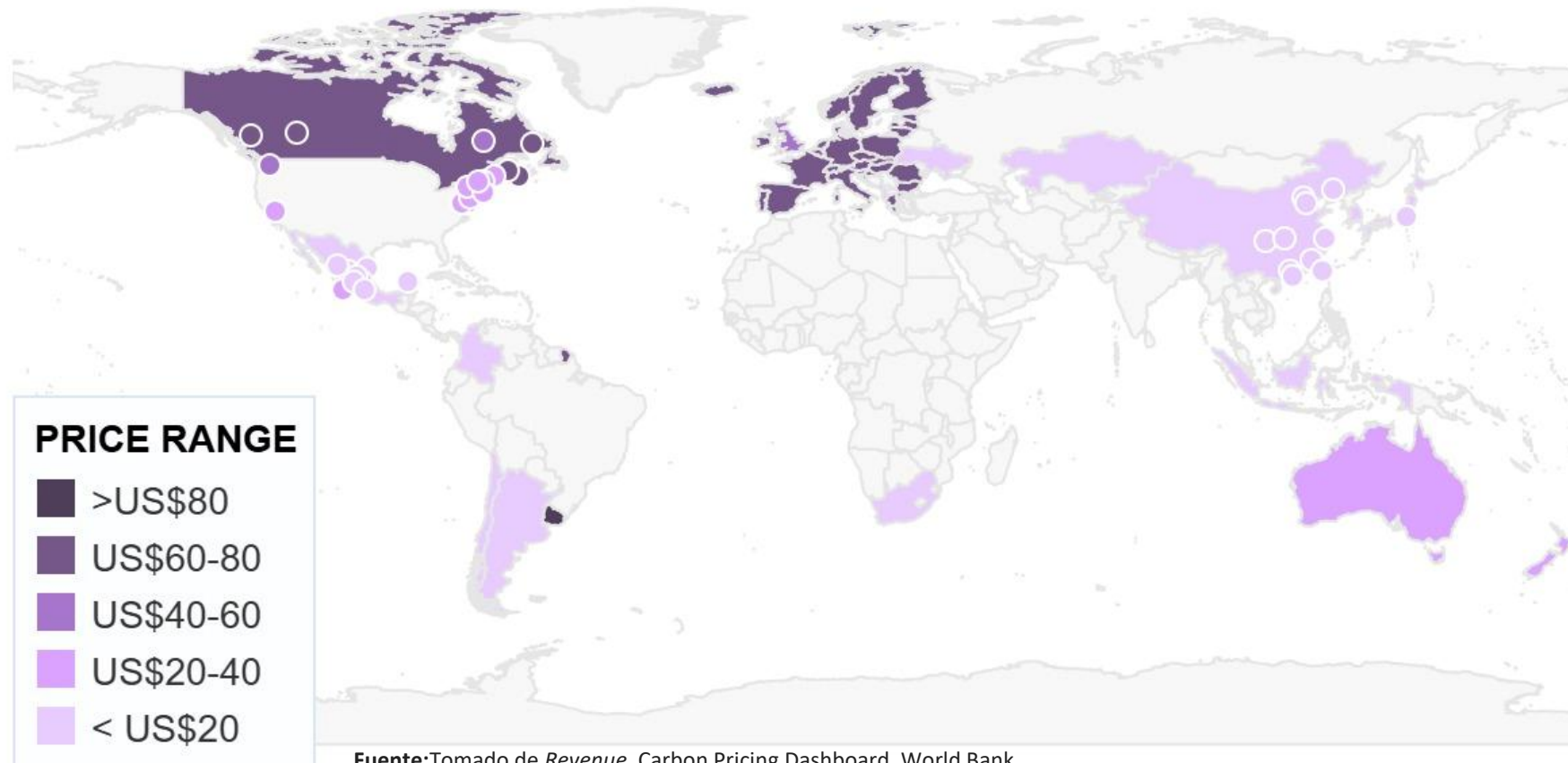
Heat map shows the level of annual government revenue collected by each jurisdiction through emissions trading systems and carbon taxes (US\$ millions/year), subject to any filters applied. The year can be adjusted using the slider below the map.



Fuente: *Revenue*, Carbon Pricing Dashboard, World Bank,
<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/revenue>

Price of carbon around the world, 2025

Heat map shows the level of the main price set by emissions trading systems or Carbon taxes in each jurisdiction (US\$/tCO₂e), subject to any filters applied. The year can be adjusted using the slider below the map.

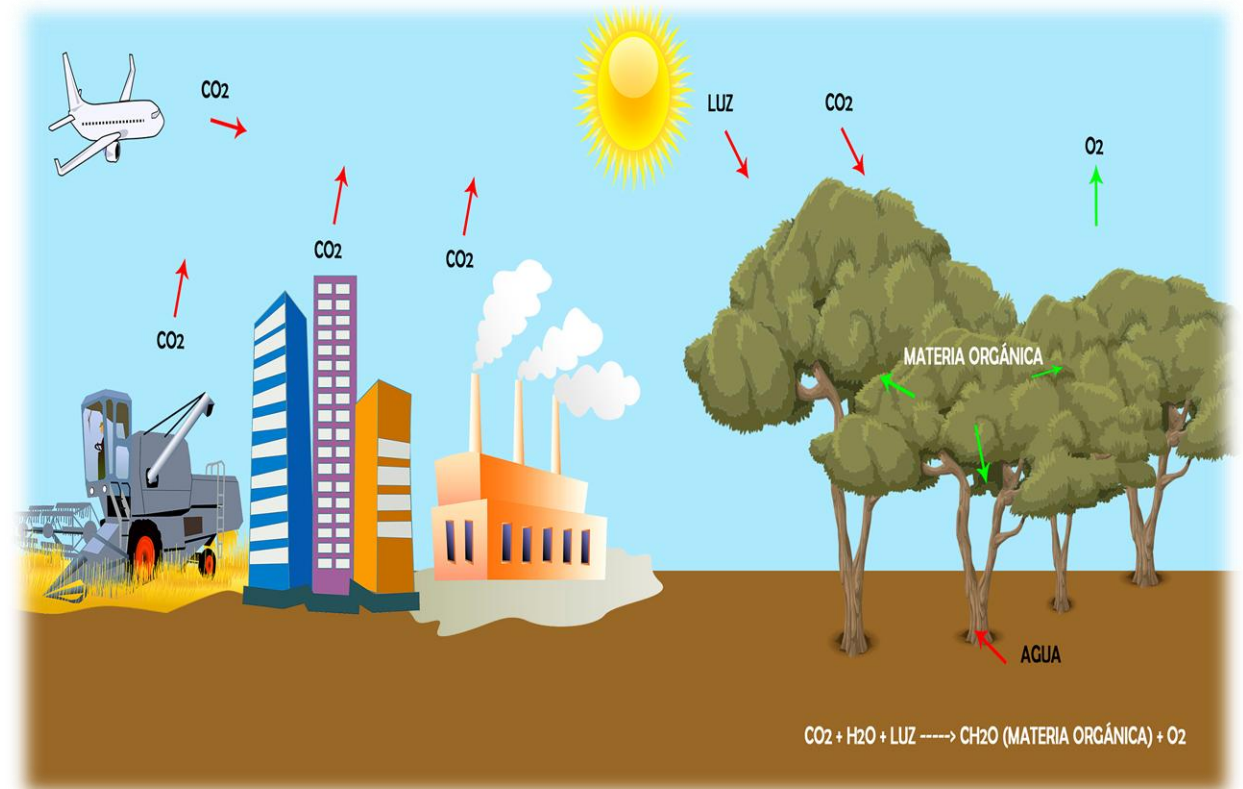


Fuente: Tomado de *Revenue*, Carbon Pricing Dashboard, World Bank, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>

Mitigación de emisión de gases de efecto invernadero.



Fuente: (Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, 2025).



Fuente: CompensaForest. *Los sistemas forestales como sumideros de CO₂*, <https://compensaforest.wordpress.com/los-sistemas-forestales-como-sumideros-de-co2/>

Antecedentes

- Ketterings et al. (2001), mediante un enfoque destructivo en bosques secundarios de Singapur, demostraron que la precisión de **ecuaciones alométricas** no destructivas mejora significativamente cuando se incluyen variables clave como el DAP, la densidad de la madera y/o la altura total del árbol.
- Balasubramanian (2019) calculó que el valor agregado de los servicios de regulación ecosistémica, como la regulación climática e hídrica entre 1997 y 2015, ascendió a 29.085 billones de dólares estadounidenses.

Antecedentes

- Zuluaga & Escobar (2018) realizaron una valoración en campo a partir de la caracterización estructural en los bosques del municipio de El Carmen de Bolívar, actúa como sumideros de carbono, con una capacidad de captura aproximada de 57.2 ton/ha.
- Mejía et al. (2023) realizaron la estimación de captura de carbono que en promedio por de 183 ton/ha en el Centro Universitario Regional del Norte.

Antecedentes



Fuente: (Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, 2025).

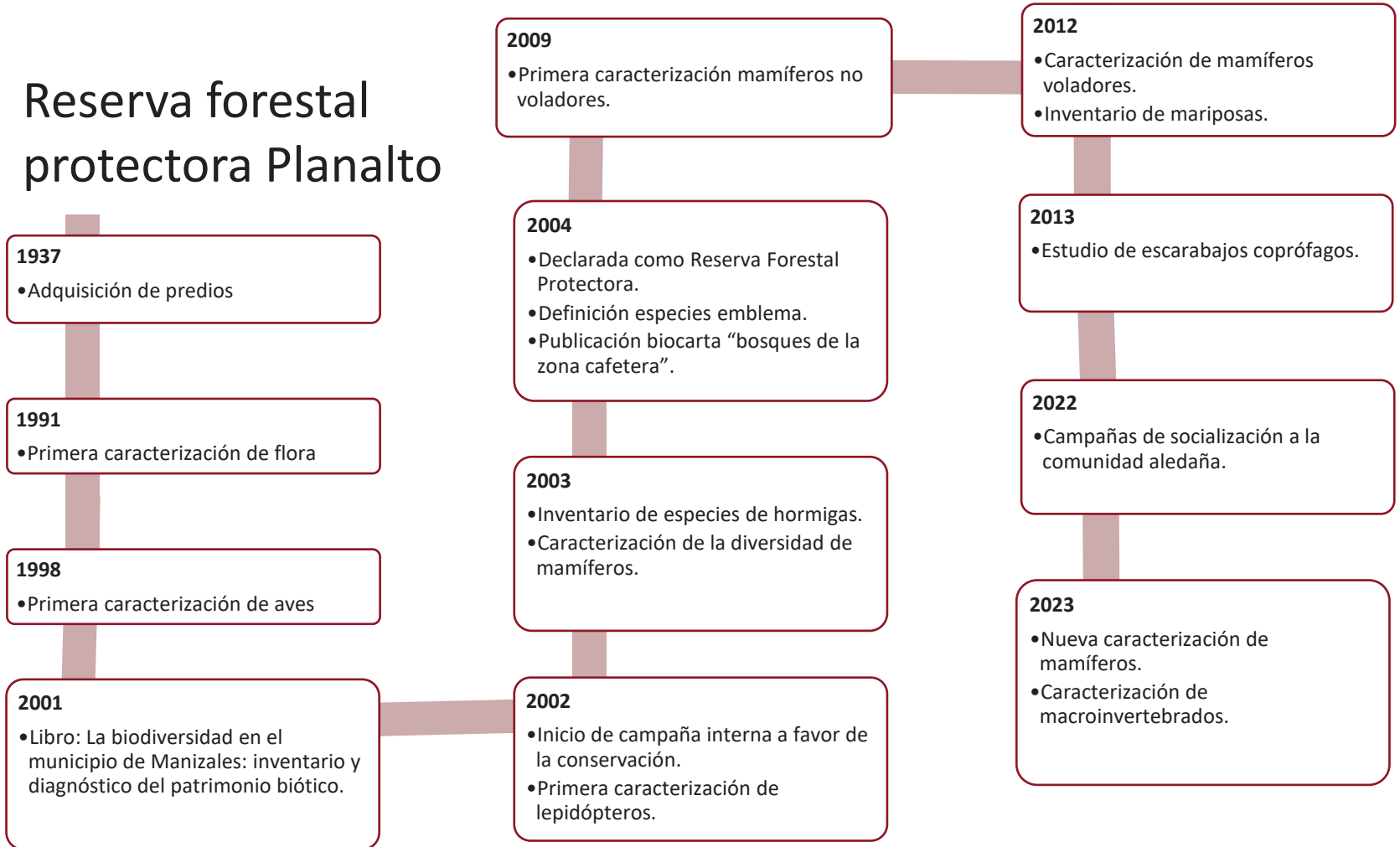
La reserva forestal Planalto se estableció con el propósito de conservar la biodiversidad y proteger los recursos naturales, como la fauna, las fuentes hídricas y la composición vegetal de este bosque.

Antecedentes

Reserva forestal protectora Planalto



Fuente: (Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, 2025).



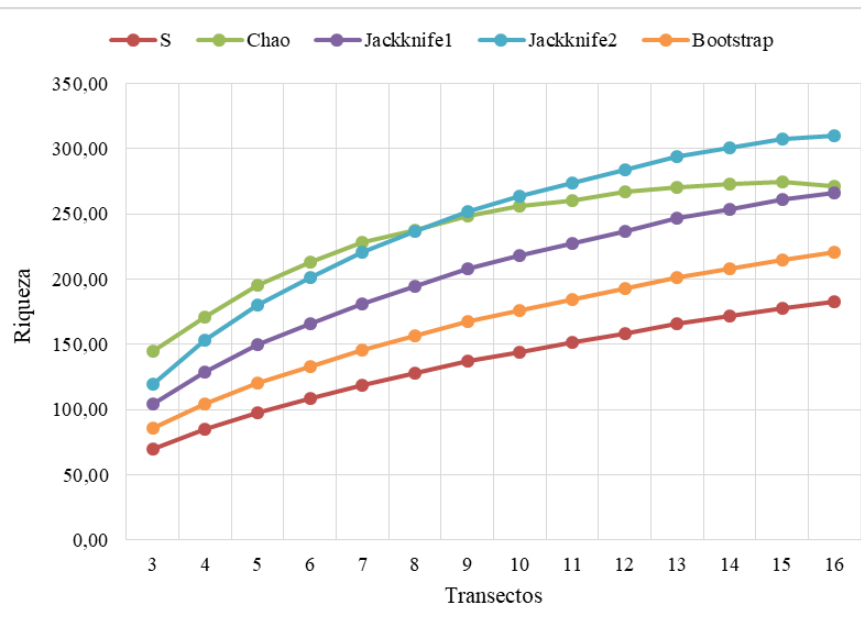
Antecedentes

- Restrepo et al. (1994). Fitografía del ecosistema de Cenicafé, Colombia. Cenicafé - Universidad de Caldas. 1- 338.
- Botero et al. (2004). Reserva de Planalto - Importancia Ecológica o Ecosistémica. Cenicafé.1-8.
- Orrego (2005). Briófitos de Caldas: La Reserva de Planalto. Boletín Científico-Centro de Museos-Museo de Historia Natural, 9, 31-50.
- Botero, et al. (2011). Estrategias para asegurar la conservación de la Reserva Forestal Protectora de Cenicafé en el Municipio de Manizales.1-14.
- Osorio et al. (2018). Plan de Manejo Reserva Forestal Protectora Planalto.1-69.

Antecedentes

Banguero-Micolta. (2021). Caracterización de la flora en la Reserva Forestal Protectora Planalto: Una aproximación a la restauración del patrimonio ambiental, con registro de 1.758 individuos (Plantas).

N°	Zonas de muestreo	Altura (msnm)
1	Zona alta (Lindero-Planalto)	1.650
2	Zona media (la Guamera)	1.400
3	Zona baja (la Granja- las mellizas)	1.300



Curvas de acumulación de especie para determinar la representatividad de los muestreos.

¿Cuál es la ecuación alométrica que mejor se ajusta para estimar la biomasa arbórea y cuantificar el valor económico del carbono capturado en la Reserva Forestal Protectora Planalto?



Fuente: Imagen generada con inteligencia artificial



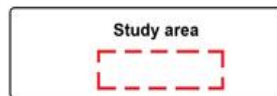
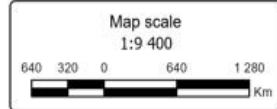
Fuente: (Federación Nacional de Cafeteros – FNC, 2025).

Determinar la ecuación alométrica óptima para estimar la biomasa arbórea y calcular el valor económico del carbono almacenado en el bosque muy húmedo premontano de la “Reserva Forestal Protectora Planalto”.

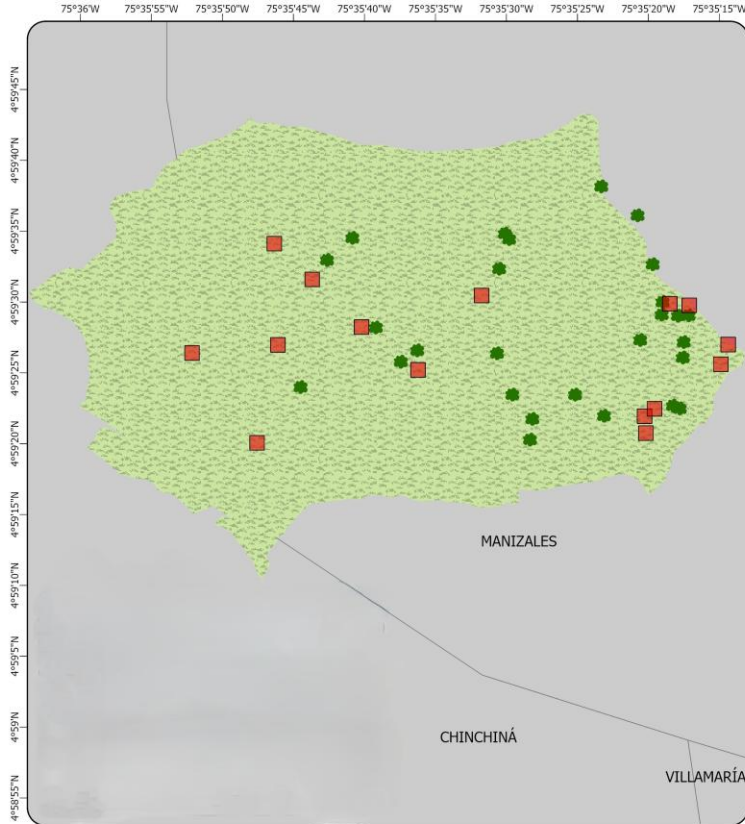
Metodología

- Está ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera Central en el departamento de Caldas, municipio de Manizales, vereda El Rosario (4°59'27''N y 75°35'33''W).
- Extensión aproximada de 94 hectáreas.
- Entre 1,300 y 1,650 msnm.
- Temperatura media de 21°C.
- Precipitación anual promedio de 2600 mm.
- Humedad relativa promedio de 80%.

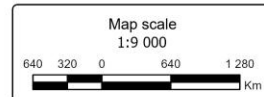
Study area
Protective Forest Reserve
Planalto



Metodología



Map of the sampling site
Protective Forest Reserve
Planalto



Collections and transects

- Free collections
- Transects
- Study area: 94ha

- Todos aquellos con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 1 cm.
- Se tomaron los datos de 1.567 (árboles).
- Altura total en metros.
- A cada individuo se le asignó un valor de densidad de la madera (ρ) para la especie, género o familia.

Metodología

Ecuación polinómica (Yepes et al., 2011): emplea transformaciones logarítmicas del DAP y la densidad de la madera (ρ), desarrollado para bosques naturales en Colombia

$$\ln(BA) = 2.421 - 1.415 \ln(DAP) + 1.236(\ln(DAP))^2 - 0.126(\ln(DAP))^3 + 1.068 \ln(\rho)$$

Ecuación genérica internacional (IPCC, 2006): fundamentada en datos de bosques tropicales, que combina el logaritmo del DAP y la densidad de la madera en un modelo exponencial.

$$BA = \rho^{(-1.239 + 1.980 * (\ln(DAP)) + (0.207 * (\ln(DAP))^2 - (0.0281 * \ln(DAP))^3)}$$

Ecuación cuadrática (Chave et al., 2005): basada en el DAP, propuesta para estimar biomasa en bosques tropicales.

$$BA = 21.297 - 6.953 * DAP + 0.740 * DAP^2$$

Ecuación multiplicativa (Higuchi & Carvalho, 1994): incorpora tanto el DAP como la altura total del árbol (h), útil para estimar biomasa en bosques tropicales con alta variabilidad estructural.

$$BA = (0.026 * DAP^{1.529} * h^{1.747}) * 0.6$$

Para las 4 ecuaciones se calcula la biomasa radicular (Br) que corresponde al 27 % de la biomasa aérea (IPCC, 2006). Finalmente, la biomasa arbórea total (BAt):

$$BAt = BA + Br$$

Metodología

Identificación del modelo probabilístico

- Se estimó la mediana de las cuatro ecuaciones por individuo, generando así biomasa compuesta (BAcompuesta).
- Se calcularon las diferencias entre los valores individuales obtenidos con cada ecuación y los correspondientes valores de la Bacompuesta.
- Transformados en variable dicotómica: se asignó un valor de 0 cuando la diferencia fue menor que cero (subestimación) y un valor de 1 cuando fue mayor que cero (sobreestimación).

Metodología

- Se seleccionó el método de estimación por máxima verosimilitud con errores estándar robustos corrigiendo posibles heterocedasticidades para los modelos Probit y Logit con datos de panel.
- métricas de ajuste y clasificación:

Akaike Information Criterion (AIC)

Pseudo R^2 de McFadden

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

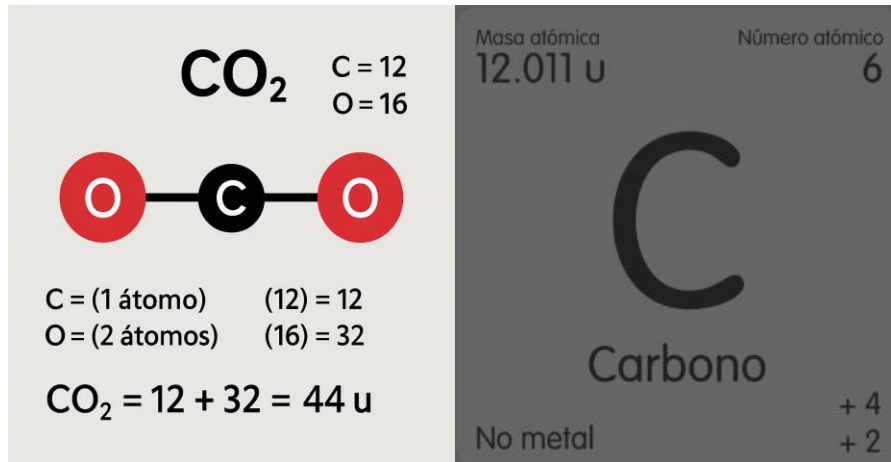
Metodología

Se asumió que la biomasa contenida en los árboles está compuesta en un 50% por carbono.

para transformar el carbono almacenado en su equivalente en dióxido de carbono (CO₂e): 3,67.



Fuente: Souza, 2024 (Agroadvance)



Fuente: Imagen generada con inteligencia artificial

Finalmente, se realizó una valoración económica del CO₂ equivalente, basada en los precios de los siguientes mercado:

- Iniciativa Regional de Gases de Efecto Invernadero de los Estados Unidos.
- Precio de referencia del mercado voluntario de carbono en Colombia.

Resultados y discusiones

1.567 individuos registrados para cada una de las variables dendrométricas como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total (m) y la densidad específica de la madera. Posteriormente, se realizó la caracterización taxonómica, determinando que los individuos pertenecen a 222 especies, agrupadas en 157 géneros y distribuidas en 69 familias botánicas correspondientes a Angiospermas y Pteridófitas.



Resultados y discusiones

A partir de esta información, se aplicaron modelos de regresión probabilística no lineal (Probit y Logit), incorporando errores estándar robustos para corregir posibles problemas de heterocedasticidad y así obtener estimaciones más confiables.

	Yepes		IPCC		Chave		Higuchi	
	Probit	Logit	Probit	Logit	Probit	Logit	Probit	Logit
Log								
pseudolikelihood	-353.101	-340.458	-438.83	-415.955	-350.752	-308.986	-376.516	-371.381
Pseudo R²	0.571	0.586	0.511	0.536	0.611	0.657	0.569	0.575
Prob>chi²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Resultados y discusiones

274,90

Classified + if predicted $\text{Pr}(D) \geq .5$. Probit Logit Probit Logit Probit Logit Probit Logit
 True D defined as $g = 0$ (Low persistence)

		Table 1: CriterioYepes	Table 2: CriterioIPCC	Table 3: CriterioChave	Table 4: CriterioHiguchi				
Sensitivity	Pr(+D)	95.22%	94.77%	82.50%	86.62%	93.78%	92.96%	82.81%	83.59%
Specificity	Pr(-D)	80.94%	81.65%	93.34%	92.93%	90.76%	94.23%	92.30%	92.30%
Positive predictive value	Pr(D+)	91.18%	91.44%	90.93%	90.83%	89.95%	93.42%	87.42%	87.53%
Negative predictive value	Pr(D-)	89.12%	88.30%	86.84%	89.57%	94.30%	93.82%	89.26%	89.69%
False + rate for true D	Pr(+D)	19.06%	18.35%	6.66%	7.07%	9.24%	5.77%	7.70%	7.70%
False - rate for true D	Pr(-D)	4.78%	5.23%	17.50%	13.38%	6.22%	7.04%	17.19%	16.41%
False + rate for classified	Pr(D+)	8.82%	8.56%	9.07%	9.17%	10.05%	6.58%	12.58%	12.47%
False - rate for classified	Pr(D-)	10.88%	11.70%	13.16%	10.43%	5.70%	6.18%	10.74%	10.31%
Correctly classified		90.57%	90.49%	88.50%	90.11%	92.18%	93.63%	88.57%	88.88%

Resultados y discusiones

Como referencia se utilizo el promedio de precios del carbono en dos mercados:

- El valor promedio registrado en las subastas del último año RGGI, con USD \$20.37 por tonelada de CO₂.
- El precio estipulado para el mercado colombiano, correspondiente a USD \$6.64 por tonelada de CO₂.

Concepto	Valor estimado por ha (USD)	Total para 94 ha (USD)
Captura de CO₂ (274.90 ton/ha)		
Valoración en mercado colombiano	\$1,825.32	\$171,579.84
Valoración en mercado RGGI	\$5,599.67	\$526,368.72
Ganadería sostenible (ingresos/ha)	\$656.00	\$61,664.00

Resultados y discusiones

Este comportamiento concuerda con Fayolle et al. (2013), quienes señalan que la ecuación de Chave es precisa en bosques con alta diversidad de especies, pero contrasta con los hallazgos de Giraldo-Salazar et al. (2025), quienes afirman que dicha ecuación tiende a subestimar en plantaciones mixtas de restauración.

En síntesis, los resultados sugieren que la estructura compleja y diversa del bosque húmedo premontano secundario favorece la aplicabilidad de la ecuación alométrica de Chave para la estimación de biomasa arbórea.

Conclusiones

- La biomasa aérea según los distintos criterios alométricos evaluados (Yepes, IPCC, Chave e Higuchi). La ecuación alométrica de Chave se consolidó como la más precisa para estimar las reservas de carbono en el bosque muy húmedo premontano de la Reserva Forestal Protectora Planalto.
- Su aplicabilidad aporta confianza en las evaluaciones de carbono, fundamentales para la valoración económica, el diseño de proyectos de mitigación y la implementación de políticas orientadas a la adaptación y mitigación del cambio climático.

Conclusiones

- Los ingresos por hectárea fueron 2.8 veces superiores en el mercado colombiano y hasta 8.5 veces mayores en el mercado internacional (RGGI). Esto posiciona la conservación como una estrategia financieramente competitiva, ambientalmente estratégica y socialmente sostenible. Estas evidencias refuerzan la necesidad de integrar la valoración económica del carbono en instrumentos de planificación territorial, proyectos REDD+ y políticas públicas de desarrollo rural bajo en emisiones.
- Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones evalúen la aplicabilidad de las ecuaciones alométricas en sistemas productivos agrícolas ambientalmente sostenibles, con el fin de mejorar la precisión y ampliar la generalización de los resultados.

Agradecimientos

- Gerencia técnica.
- Dirección.
- Equipo de la disciplina de biometría.
- Mauricio Salazar.
- Carlos Augusto Ramírez.



Cenicafé

Centro Nacional de Investigaciones de Café

Reserva Forestal Protectora Planalto

www.cenicafe.org



Cenicafé FNC



@cenicafe



cenicafé



CenicaféFNC



@cenicafefnc



MÁS FEDERACIÓN