

Simposio Virtual Internacional de Ciencias - GLOBE 2025



EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO EN ESPECIES DE ÁRBOLES NATIVAS Y EXÓTICAS

Estudiantes participantes:

Micaela Burroso - Francesca Briozzo - Juana Bazzino - Emily Russi - Bruno Acevedo -
João Olivera - Zara Soca - Samira Mello - Enzo Matta - Alejo Masaguez - Valentín Garreta
- Matías Silva - Benjamín Bértola - Kiara da Silva - Camila Cougett

Docente Orientador:

Darío Greni Olivieri

Escuela Rural N° 88, "Alfred Nobel"

Las Violetas, Canelones

TÍTULO	2
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	2
HIPÓTESIS	3
Hipótesis Nula (H0):	3
Hipótesis Alternativa (H1):	3
OBJETIVOS	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	4
INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA	4
MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	6
Sitio de Estudio	6
Obtención de Datos	8
• Protocolo de Altura del Árbol	8
• Protocolo de la circunferencia del tronco del árbol	8
Análisis de Datos	10
1. Estimación de la Biomasa:	10
2. Cálculo del Contenido de Carbono:	10
3. Cálculo del carbono secuestrado en los próximos 20 años:	10
Impacto a la hora de trabajar con un científico	11
RESULTADOS	12
Tabla 3: Información biométrica de los árboles del predio escolar	14
DISCUSIÓN	19
Apoyo a la Hipótesis	20
CONCLUSIONES	20
BIBLIOGRAFÍA	22
ANEXO 1	24
1. I AM A DATA SCIENTIST	24
2. I AM AN EARTH SYSTEM SCIENTIST	24
3. I MAKE AN IMPACT	24
4. I AM A PROBLEM SOLVER	25
5. I AM A COLLABORATOR	25

TÍTULO

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO EN ESPECIES DE ÁRBOLES NATIVAS Y EXÓTICAS

RESUMEN

El carbono es un elemento esencial para los seres vivos y desempeña un rol fundamental en la regulación del clima. Los árboles, a través de la fotosíntesis, capturan el carbono de la atmósfera y lo almacenan, contribuyendo así a mitigar los efectos del calentamiento global. Sin embargo, no todos los árboles almacenan la misma cantidad de carbono, esta puede variar en función de las condiciones climáticas, edáficas y la capacidad de adaptación de las especies. Un estudio de la Escuela Rural N° 88 en Las Violetas, Canelones, Uruguay, comparó la capacidad de almacenamiento de carbono de 8 ejemplares de árboles nativos y 37 ejemplares de árboles exóticos. Aplicando ecuaciones alométricas y protocolos del Programa GLOBE se calculó la biomasa de cada árbol en base a su altura y diámetro. Posteriormente, el valor de la biomasa se tomó como referencia para estimar la cantidad de carbono almacenado en cada individuo. Asimismo, utilizando el modelo Eco v6 del software i-Tree se estimó la proyección de almacenamiento de carbono de los árboles a 20 años. Los resultados sugieren con una confianza del 95% que los árboles nativos almacenan más carbono (promedio de 3,30 ton) en la actualidad que los árboles exóticos (promedio de 1,21 ton). Sin embargo, la proyección a 20 años muestra un resultado opuesto, probablemente debido a la condición y edad de los árboles, lo que podría afectar su desarrollo a futuro. En conclusión, aunque los árboles nativos tienen una mayor capacidad de almacenamiento de carbono, cuando están en buen estado, en comparación con los árboles exóticos; estos últimos suelen tener la ventaja de una mayor velocidad de crecimiento. Por esta razón sería recomendable seguir una estrategia de manejo forestal que combine la conservación de especies nativas en buen estado con una presencia menor de especies exóticas, manejadas adecuadamente, para maximizar el secuestro de carbono y garantizar la resiliencia del ecosistema, contribuyendo eficazmente a la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: secuestro de carbono, especies nativas, especies exóticas, cambio climático, manejo forestal.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo varía el secuestro de carbono entre los árboles nativos y exóticos presentes en el predio escolar?

¿La tendencia en la capacidad de almacenamiento de carbono de los árboles nativos y exóticos se mantiene a lo largo del tiempo?

Esta pregunta de investigación es relevante porque busca explorar si existen diferencias significativas en la capacidad de los árboles nativos versus los árboles exóticos para almacenar carbono, factor clave en la mitigación del cambio climático. Al comparar estas dos categorías de especies arbóreas, se podrá obtener una comprensión más profunda de cuál es más efectiva en el secuestro de carbono. A su vez, este resultado podría derivar en futuras estrategias de reforestación y manejo forestal. Además, esta investigación tiene implicaciones tanto para la conservación de la biodiversidad como para la implementación de prácticas sostenibles en entornos escolares y comunitarios.

HIPÓTESIS

Para abordar la pregunta de investigación sobre cómo varía la capacidad de almacenamiento de carbono entre los árboles nativos y exóticos presentes en el predio escolar, se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H0):

La capacidad de almacenamiento de carbono en árboles nativos y exóticos del predio escolar no presenta diferencias significativas a lo largo del tiempo

Hipótesis alternativa (H1):

Los árboles nativos tienen una mayor capacidad de almacenar carbono en comparación con los árboles exóticos en el presente

La capacidad de almacenamiento de carbono de los árboles nativos y de los árboles exóticos cambia a lo largo del tiempo

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la capacidad de secuestro de carbono de 45 árboles presentes en el predio escolar, con un enfoque particular en la comparación entre especies nativas y exóticas.

Objetivos específicos

- Realizar mediciones de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada árbol.
- Determinar la biomasa aérea de cada uno de los 45 árboles del predio escolar utilizando ecuaciones alométricas adecuadas para cada especie.
- Identificar las especies de árboles presentes en el predio para aplicar las ecuaciones alométricas correspondientes.
- Calcular el contenido de carbono almacenado en la biomasa de cada árbol.
- Comparar la capacidad de almacenamiento de carbono entre especies autóctonas y exóticas.

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA

El carbono es un elemento esencial para la vida en la Tierra y desempeña un papel fundamental en los procesos que regulan el clima global. Los árboles actúan como reservorios de carbono, absorbiendo dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y almacenándolo en su biomasa a través de la fotosíntesis (Sedjo, 1990; Perry, 1994), lo que contribuye a mitigar el cambio climático. Este proceso convierte a los árboles en aliados cruciales en la lucha contra el calentamiento global. Sin embargo, también es importante tener en cuenta que, al mismo tiempo que los vegetales capturan carbono de ese reservorio, también lo liberan por los procesos naturales de respiración, declinación y muerte (Watson y Casper, 1984).” (Figueroa-Navarro, 2005). Razón por la cual es importante mantener un adecuado proceso de manejo forestal.

“El carbono también está presente en la atmósfera terrestre, suelos, océanos y corteza. Cuando vemos la tierra como sistema, estos componentes pueden ser llamados reservorios de carbono (o también existencias) porque actúan como almacenes de grandes cantidades de carbono. Cualquier movimiento entre estos reservorios es llamado un flujo. En cualquier sistema integrado, los flujos conectan los reservorios juntos para crear ciclos y retroalimentaciones.” (GLOBE, 2005).

La capacidad de los bosques para almacenar carbono depende de muchos factores, más allá de las condiciones climáticas y edáficas. Entre estos otros factores se puede considerar el tipo de especie dominante o el tipo de gestión forestal (Bor et al., 2023). Al respecto, los árboles nativos, definidos como aquellos que forman parte de la biodiversidad natural de una región, habiendo evolucionado en ese lugar o habiéndose dispersado allí sin intervención humana, serían los más adaptados a las condiciones locales y por lo tanto los

más eficientes en su crecimiento y en su capacidad para resistir enfermedades y plagas (Richardson et al., 2000). Por estas razones estos árboles podrían tener una mayor capacidad de almacenar carbono, conservar el suelo, un mejor manejo hídrico y mantener la biodiversidad local, en comparación con los árboles exóticos (Arhuire- Osorio et al., 2022; Qian et al., 2024).

Por otro lado, los árboles exóticos se pueden definir como aquellos que han sido introducidos en áreas fuera de su distribución geográfica nativa, ya sea de manera intencional o accidental (Richardson et al., 2000). Estos árboles podrían tener algunas ventajas sobre los árboles nativos como una rápida velocidad de crecimiento, y crecimiento uniforme (Pötzelsberger et al., 2020)

El proyecto de ciencias propuesto se centró en la medición y análisis del carbono almacenado en diferentes especies de árboles en un área específica del predio escolar, con un enfoque particular en las especies nativas y exóticas. Los estudiantes aprendieron a medir el contorno de los árboles y calcularon la cantidad de carbono almacenado utilizando ecuaciones alométricas. Además de entender el papel de los árboles en el ciclo del carbono, el proyecto destacó la importancia de la reforestación con especies nativas como una estrategia clave para la mitigación del cambio climático. Los estudiantes exploraron cómo la gestión forestal sostenible y la restauración de áreas degradadas con árboles nativos, promoviendo la diversidad, puede aumentar la capacidad de los ecosistemas para actuar como sumideros de carbono. Según Bor et al. (2023), "las investigaciones han demostrado que la forestación/reforestación y una gestión adecuada de los bosques ya existentes pueden ser herramientas eficaces para la mitigación del cambio climático (Canadell y Raupach 2008; Doelman et al. 2020; Kimble et al. 2002)" (citado en Bor et al., 2023).

Este proyecto permitió a los estudiantes comprender mejor la importancia de los árboles en el ciclo del carbono y la forma en la que sus acciones pueden contribuir a un ambiente más sostenible. Además, ha permitido a los estudiantes aplicar conceptos matemáticos esenciales, como la medición de circunferencias y alturas de los árboles, así como el uso de ecuaciones alométricas para calcular la biomasa. Estas actividades no solo refuerzan el aprendizaje de las matemáticas al poner en práctica operaciones y fórmulas, sino que también muestran cómo los conceptos matemáticos pueden ser utilizados en situaciones del mundo real, como la proyección del secuestro de carbono, lo que enriquece su comprensión y relevancia.

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En este estudio, se analizaron los datos recopilados de 45 árboles del predio escolar, entre los que se incluyeron especies tanto nativas como exóticas. Los análisis se centraron en el cálculo de la biomasa de los árboles en función a su altura y circunferencia (a 130 cm.) para determinar la capacidad de almacenamiento de carbono proyectado a 20 años utilizando la combinación de mediciones en campo y modelos matemáticos.

Sitio de estudio

El sitio de estudio elegido fue la Escuela Rural N° 88 en Las Violetas, Canelones, Uruguay, localizada a -34.5668 de latitud -56.2975 de longitud. (Figura 1) Este lugar cubre una extensión de poco más de media hectárea. La vegetación que rodea el área estudiada actúa como barrera natural contra los vientos provenientes del sur y suroeste, contribuyendo a mantener una temperatura superficial y del aire más alta en comparación con las zonas desprovistas de este tipo de cobertura vegetal. Además, el área está rodeada por campos que cuentan con vegetación natural, como gramíneas, chilcas (*Baccharis salicifolia*) y carqueja (*Baccharis trimera*).

Para el Programa GLOBE las variables climáticas son elementos fundamentales para describir las condiciones atmosféricas de un lugar en un momento dado. Al respecto, el clima en el área es templado, con precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año. Los inviernos tienen temperaturas medias superiores a 8°C , mientras que en el verano las temperaturas medias se sitúan alrededor de los 20°C . En general, el clima del país es clasificado como templado subtropical, con inviernos relativamente suaves y precipitaciones que, aunque irregulares, no presentan una estacionalidad seca marcada. La variabilidad en los elementos climáticos, tanto entre estaciones como dentro de una misma estación, es una de las características más destacadas del clima uruguayo. Según Koppen-Geiger el clima se define como Cfa, es decir un clima templado, húmedo con veranos cálidos.

Varios factores determinan el clima de esta zona, entre estos la latitud, que coloca a Uruguay en la zona templada de insolación. La circulación atmosférica, influenciada por el anticiclón del Atlántico, que trae vientos húmedos del noreste, y por el anticiclón del Pacífico Sur, que aporta vientos fríos y secos desde el suroeste, también juega un papel crucial. La altitud baja del país, con una topografía que no supera los 514 metros sobre el nivel del mar, significa que las temperaturas no varían significativamente por efectos altitudinales. Además, la proximidad al océano Atlántico, con más de 150 km de costa, actúa como un moderador de las temperaturas, especialmente en las zonas costeras.

La temperatura media anual es de 17,5°C, variando de 16,5°C en el sur a cerca de 20°C en el norte. Las precipitaciones, aunque distribuidas durante todo el año, muestran un patrón de incremento de sur a noreste, con valores anuales que van desde más de 1000 mm en la costa del Río de la Plata hasta entre 1300 y 1500 mm en el noreste del país. A pesar de su distribución anual, las precipitaciones son extremadamente irregulares y varían anualmente, influenciadas por fenómenos como El Niño y La Niña. Agosto es el mes menos lluvioso, con un promedio de 70 mm. La humedad relativa media anual es de entre 70% y 75%, siendo julio el mes más húmedo (80%) y enero el más seco (60%).

En resumen, las cuatro estaciones en Uruguay están claramente diferenciadas por la temperatura, aunque el tiempo es altamente variable, con rápidos cambios en las condiciones meteorológicas debido a la interacción de los factores mencionados. Estas características asociadas a la temperatura y precipitación colocan a Uruguay dentro de la zona de vida bosque húmedo templado cálido.

La cobertura del suelo en el predio incluye principalmente áreas de gramíneas, junto con espacios parcialmente sombreados debido a la presencia de los 45 árboles estudiados. Estos árboles varían en edad, tamaño y especie, lo que permitirá una evaluación diversa del almacenamiento de carbono (Figura 2)

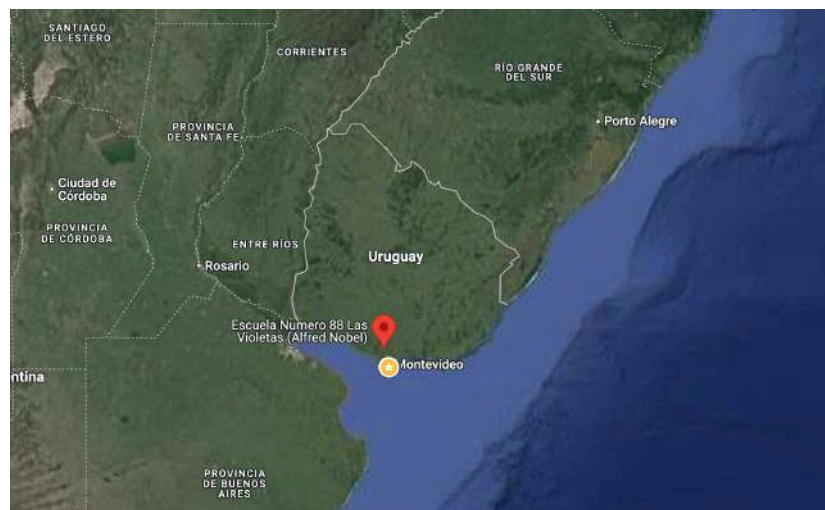


Figura 1: Ubicación del sitio de estudio



Figura 2: Imagen del predio escolar mostrando la cobertura de árboles

Obtención de datos

Los datos se recopilaron utilizando los protocolos del Programa GLOBE, específicamente aquellos diseñados para medir la biomasa de los árboles y estimar el almacenamiento de carbono. Los protocolos utilizados fueron los siguientes:

- **Protocolo de altura del árbol**
 - Medición de la altura de cada uno de los 45 árboles utilizando un clinómetro y la aplicación digital GLOBE Observer. (<https://www.globe.gov/documents/355050/bcc8abd6-68c9-4c2c-9f0c-cc60c7141701>)
- **Protocolo de la circunferencia del tronco del árbol**
 - Medición del contorno del tronco a una altura de 1.35 metros (DAP) utilizando una cinta métrica. (<https://www.globe.gov/documents/355050/3f715849-b7c0-4a39-92b7-3ab251a6dce7>)
- **Identificación de especies:**
 - La identificación de la especie de cada árbol se hizo utilizando la Guía de identificación de especies arbóreas nativas. Uruguay (versión 2023)

Figuras de la metodología



El método de muestreo incluyó la medición de los 45 árboles del predio. Los datos fueron ingresados directamente en la página Web del Programa GLOBE, siguiendo los protocolos

de colecta de datos mencionados y las instrucciones de entrada de datos establecidos por el Programa GLOBE (Figura 3)

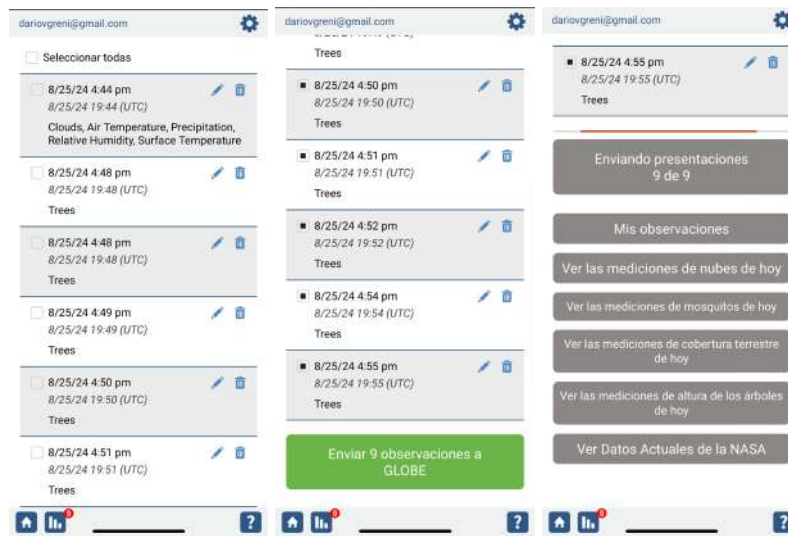


Figura 3: Capturas de pantalla de la App GLOBE Observer que muestran envío de mediciones a la base de datos GLOBE

Análisis de datos

Para analizar los datos recopilados, se aplicaron los siguientes cálculos matemáticos:

1. Estimación de la biomasa:

- a. Se utilizó la ecuación específica para estimar la biomasa de cada árbol en kilogramos. $Biomasa\ de\ un\ árbol(Kg) = Exp(B + B * lnDAP)$
<https://www.globe.gov/documents/355050/41927208/TreeBiomassCarbonAnalysis.pdf/6dad96c7-7b04-432b-b02e-1038a026062f>

2. Cálculo del contenido de carbono:

- a. Aproximadamente el 50% de la biomasa seca de un árbol es carbono. Por lo tanto, el contenido de carbono se calculó como:
 Contenido de Carbono (kg)=Biomasa (kg)×0.50

3. Cálculo del carbono secuestrado en los próximos 20 años:

- a. La cantidad de carbono secuestrado se calculó empleando el recurso digital iTree (<https://mytree.itreetools.org/>) es un conjunto de programas informáticos de última generación, revisados por expertos, del Servicio Forestal del USDA que proporciona herramientas de análisis y evaluación de beneficios del arbolado urbano y rural. Esta herramienta a través de modelos permite hacer proyecciones sobre el crecimiento de los árboles y su

capacidad para ofrecer servicios ecosistémicos a lo largo del tiempo, entre ellos la capacidad de almacenamiento de carbono.

Estos cálculos se aplicaron a los 45 árboles del predio, permitiendo obtener una estimación del carbono total almacenado y del CO₂ absorbido por cada árbol y el predio en su conjunto. Este análisis proporcionó datos suficientes para responder la pregunta de investigación sobre la capacidad de los árboles nativos en la escuela para almacenar carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático a lo largo del tiempo.

Impacto a la hora de trabajar con un científico

El impacto de trabajar con un mentor de proyecto ha sido un factor clave para el éxito y el enriquecimiento de este estudio. La colaboración con expertos nos permitió abordar el tema con mayor rigor y profundidad. En primer lugar, Ana Prieto fue fundamental en todo lo referente al cálculo de la alometría y la biomasa, así como en la estimación del almacenamiento de carbono. Su experiencia en estas áreas nos permitió obtener datos precisos y fiables, y comprender mejor los procesos involucrados en la captura de carbono por parte de los árboles. Este conocimiento fue esencial para la elaboración de nuestras conclusiones y proyecciones.

Por otro lado, el trabajo con Claudia Caro fue igualmente crucial, ya que nos guió en el análisis estadístico de los datos obtenidos. Claudia no solo nos proporcionó herramientas para realizar los cálculos correspondientes, sino que también nos ayudó a interpretar estos resultados de manera adecuada. Además, fue un apoyo invaluable a la hora de definir el vocabulario técnico específico, lo que permitió que el informe tuviera una terminología precisa y apropiada para un contexto científico. Un aspecto particularmente enriquecedor de esta colaboración fue la realización de varias videoconferencias en las que Claudia explicó en detalle temas específicos relacionados con el análisis estadístico, clarificando dudas y permitiéndonos aplicar los conceptos directamente en nuestro estudio. Estas sesiones resultaron en un aprendizaje profundo que impactó positivamente en la calidad de nuestro análisis.

Por último, el contacto con María del Pilar Castro Díez, docente universitaria en Ecología, aportó una dimensión adicional al proyecto. A través de su asesoramiento, recibimos artículos científicos relevantes que ampliaron nuestro conocimiento y nos proporcionaron un marco teórico actualizado y pertinente para el trabajo. Además, este contacto nos abrió la posibilidad de futuras colaboraciones e intercambios de información, lo que sin duda enriquecerá proyectos venideros.

En resumen, el apoyo de estos mentores no solo mejoró significativamente la calidad técnica y científica del proyecto, sino que también fomentó un aprendizaje colaborativo que permitió a todos los involucrados ampliar sus conocimientos y habilidades en áreas clave como la biomasa, el almacenamiento de carbono y el análisis estadístico. Esta experiencia ha dejado una huella profunda en nuestra capacidad de desarrollar proyectos de investigación rigurosos y bien fundamentados.

RESULTADOS

Especies de árboles identificados en el predio escolar:

La Tabla 1 presenta la lista de árboles que se encontraron en la escuela, en ella se puede ver que la especie más abundante es *Fraxinus americana*, una especie exótica conocida como fresno americano, seguida por *Fraxinus excelsior* o fresno común. De las especies nativas, la más abundante es *Salix babylonica* conocida como sauce criollo. En general, de 45 árboles distribuidos en el predio escolar, 8 fueron ejemplares nativos y 37 fueron exóticos. El grupo de especies, a su vez, se definió de acuerdo a esta tabla proporcionada por GLOBE:

Tabla 1: Coeficientes para calcular la biomasa de cada una de las especies de árboles

SpeciesGroup	Coefficients for Aboveground Biomass	
	B0	B1
AspenAlder	-2,2094	2,3867
CedarLarch	-2,0336	2,2592
DougFir	-2,2304	2,4435
FirHemlock	-2,5384	2,4814
MapleOak	-2,0127	2,4342
MixedHardwood	-2,4800	2,4835
Pine	-2,5356	2,4349
SoftMapleBirch	-1,9123	2,3651
Spruce	-2,0773	2,3323
Woodland	-0,7152	1,7029
LowWoodDensitySpecies	-2,5356	2,4349
MediumWoodDensitySpecies	-2,4800	2,4835
HighWoodDensitySpecies	-2,0127	2,4342

Tabla 2: Especies de árboles del predio escolar

NOMBRE CIENTÍFICO	NATIVO	EXÓTICO	NOMBRE COMÚN	CANTIDAD	GRUPOS DE ESPECIES
<i>Fraxinus americana</i>		X	Fresno americano	10	MixedHardwood
<i>Fraxinus excelsior</i>		X	Fresno común	9	MixedHardwood
<i>Melia Azadarach</i>		X	Paraíso	7	SoftMapleBirch
<i>Populus deltoides</i>		X	Alamo	5	AspenAlder
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		X	Eucalipto	3	MixedHardwood
<i>Salix babylonica</i>	X		Sauce criollo	3	AspenAlder
<i>Peltophorum dubium</i>	X		Ibirapitá	2	MixedHardwood
<i>Erythrina crista-galli</i>	X		Ceibo	2	SoftMapleBirch
<i>Carya illinoensis</i>		X	Nogal pecano	1	MapleOak
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	X		Timbó	1	MixedHardwood
<i>Casuarina equisetifolia</i>		X	Casuarina	1	Pine
<i>Araucaria angustifolia</i>		X	Araucaria	1	Pine
TOTAL DE ÁRBOLES				45	

Cálculo de la capacidad de almacenamiento de carbono de los árboles

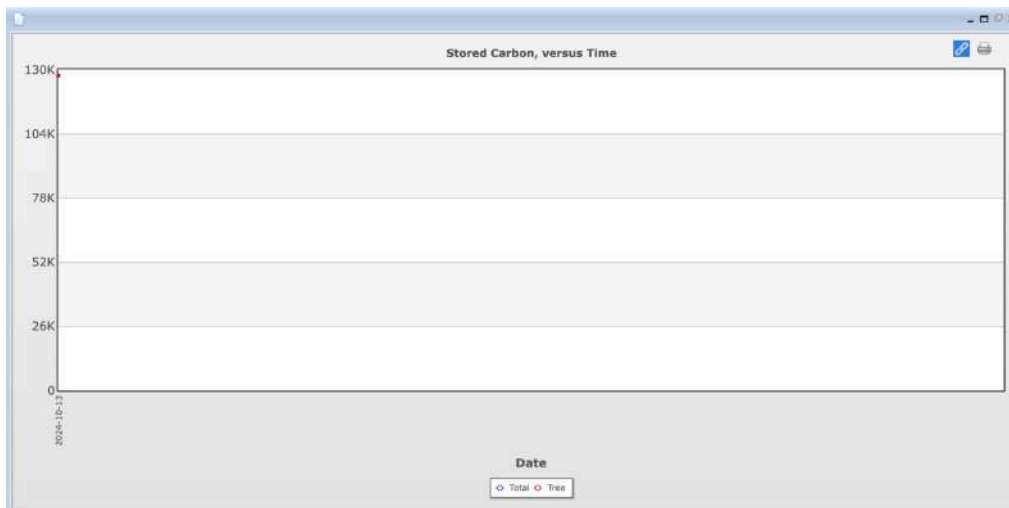
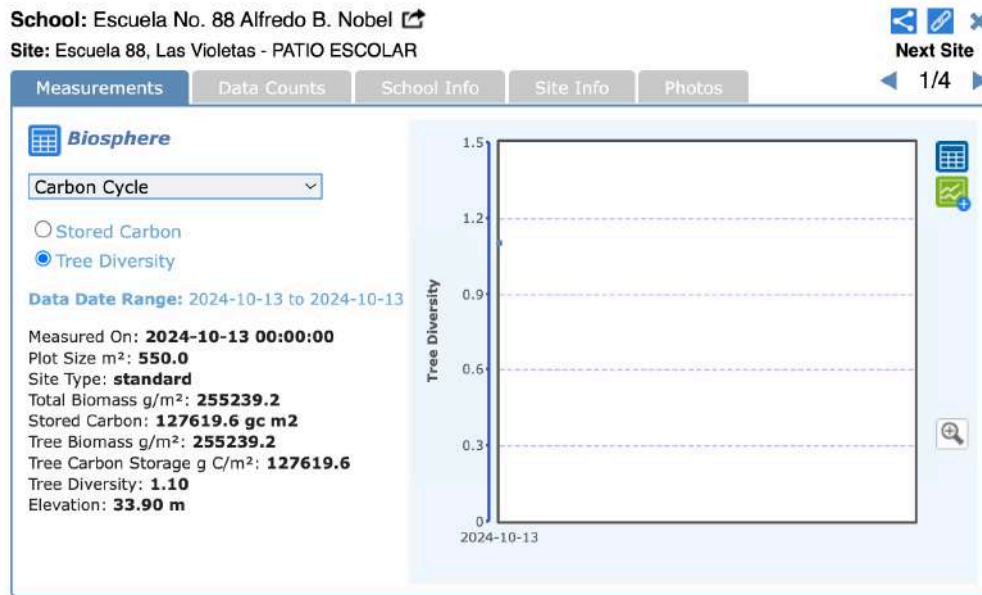
La tabla 2 muestra la información de cada uno de los ejemplares de árboles que se encuentran en el predio escolar. Entre ellos se destaca el **Sauce Criollo (*Salix babylonica*)** del registro 36 (479 cm de circunferencia y 152.47 cm de diámetro) como el que tiene la mayor cantidad de biomasa con un total de **17,827.03 kg**. Asimismo, esta sería la especie con mayor secuestro de carbono en 20 años con un secuestro de **11,124 kg de carbono**. Por otro lado, el árbol con menor cantidad de carbono almacenado es El **Ibirapitá (*Peltophorum dubium*)** con solo **78 kg** en 20 años.

Tabla 3: Información biométrica de los árboles del predio escolar

ÁRBOL	GRUPO DE ESPECIES	CIRCUNFERENCIA (cm)	Altura (metros)	DIÁMETRO(cm)	TOTAL DE BIOMASA(kg)	SECUESTRO DE CARBONO (kg) EN 20 AÑOS
<i>Fraxinus americana</i> - FRESNO AMERICANO						
1	MixedHardwood	250,0	8,37	79,58	4401,11	4211
2	MixedHardwood	120,0	9,33	38,20	711,09	1470
3	MixedHardwood	85,0	7,2	27,06	301,99	1210
4	MixedHardwood	140,0	10,5	44,56	1042,77	2103
5	MixedHardwood	81,0	5,56	25,78	267,92	1147
6	MixedHardwood	306,0	8,34	97,40	7270,55	4103
7	MixedHardwood	152,0	7,12	48,38	1279,05	2317
8	MixedHardwood	94,0	7,45	29,92	387,74	624
9	MixedHardwood	82,0	6,8	26,10	276,21	1165
10	MixedHardwood	71,0	6,6	22,60	193,14	1005
<i>Fraxinus excelsior</i> - FRESNO COMÚN						
11	MixedHardwood	42,0	7,32	13,37	52,43	840
12	MixedHardwood	41,0	5,01	13,05	49,39	829
13	MixedHardwood	56,0	7,14	17,83	107,13	551
14	MixedHardwood	67,0	7,4	21,33	167,24	697
15	MixedHardwood	106,0	18,03	33,74	522,55	1131
16	MixedHardwood	49,0	7,61	15,60	76,89	421
17	MixedHardwood	90,0	8,05	28,65	348,05	790
18	MixedHardwood	89,0	7,34	28,33	338,52	934
19	MixedHardwood	96,0	8,34	30,56	408,55	847
<i>Melia azedarach</i> - PARAÍSO						
20	SoftMapleBirch	180,0	8,13	57,30	2126,35	1558
21	SoftMapleBirch	191,0	9,65	60,80	2446,59	944
22	SoftMapleBirch	235,0	13,16	74,80	3994,86	1640
23	SoftMapleBirch	363,0	6,56	115,55	11171,84	29
24	SoftMapleBirch	205,0	8,45	65,25	2892,13	904
25	SoftMapleBirch	59,0	6,8	18,78	152,03	643
26	SoftMapleBirch	36,0	7,5	11,46	47,26	319
<i>Populus deltoides</i> - ÁLAMO						
27	AspenAlder	280,0	20,84	89,13	4949,42	5939
28	AspenAlder	161,0	18,02	51,25	1321,15	3376
29	AspenAlder	147,0	19,37	46,79	1063,31	3065
30	AspenAlder	243,0	19,07	77,35	3528,98	5642
31	AspenAlder	79,0	13,07	25,15	241,54	1506
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> - EUCALIPTO						
32	MixedHardwood	489,0	23,08	155,65	23290,38	38
33	MixedHardwood	182,0	22,51	57,93	2000,62	4037
34	MixedHardwood	328,0	16,42	104,41	8638,75	1088
<i>Salix babylonica</i> - SAUCE CRIOLLO						
35	AspenAlder	353,0	14,36	112,36	8603,91	50
36	AspenAlder	479,0	11,34	152,47	17827,03	11
37	AspenAlder	273,0	10,46	86,90	4659,20	251
<i>Peltophorum dubium</i> - IBIRAPITÁ						
38	MixedHardwood	324,0	15,16	103,13	8379,47	78
39	MixedHardwood	204,0	9,63	64,94	2656,10	1739
<i>Erythrina crista-galli</i> - CEIBO						
40	SoftMapleBirch	272,0	5,84	86,58	5645,32	15
41	SoftMapleBirch	212,0	9,45	67,48	3131,17	17
<i>Carya illinoensis</i> - NOGAL PECANO						
42	MapleOak	168,0	12,67	53,48	2150,71	1132
<i>Enterolobium contorsiliquum</i> - TIMBÓ						
43	MixedHardwood	179,0	5,04	56,98	1919,72	2118
<i>Casuarina equisetifolia</i> - CASUARINA						
44	Pine	143,0	14,03	45,52	863,62	891
<i>Araucaria angustifolia</i> - ARAUCARIA						
45	Pine	100,0	11,5	31,83	361,49	2711

Nota: En naranja se han resaltado las especies nativas.

Captura de datos desde la web de GLOBE



La Figura 4 muestra la distribución de los árboles en el campus de la escuela, representados con círculos cuyo tamaño varía en función de la altura de los árboles. El árbol más alto en el campus alcanza una altura de 23,08 metros, mientras que el más bajo mide 5,01 metros. La disposición de los árboles permite visualizar una amplia variedad de tamaños, con algunas especies que destacan por su gran envergadura, lo que contribuye significativamente al paisaje general del predio. Esta representación gráfica facilita la comparación de las alturas y permite un análisis visual de la estructura arbórea en el predio escolar.

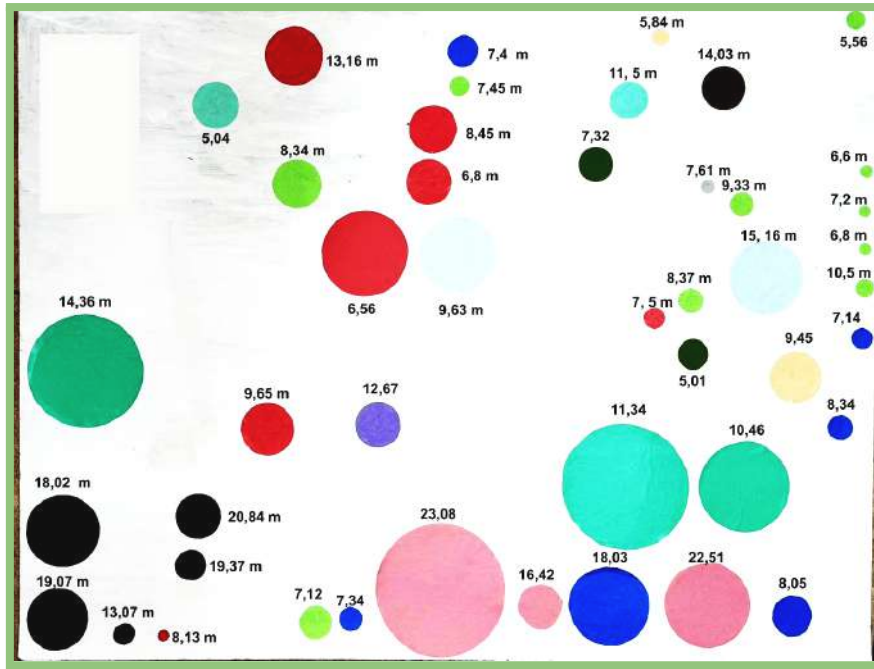


Figura 4: Plano creado por los estudiantes mostrando la distribución de los árboles y la altura de cada uno de ellos. Los diferentes colores muestran cada una de las especies presentes.

La Figura 5 presenta las circunferencias (CBH) de las 10 especies de árboles presentes en el predio escolar. Este gráfico es clave para entender las diferencias en la biomasa y, por lo tanto, en la capacidad de secuestro de carbono. Las especies con mayores circunferencias, como los álamos y los eucaliptos, muestran una mayor capacidad de secuestro de carbono, mientras que especies con circunferencias menores, como el ceibo y el timbó, tienen una capacidad menor, aunque también pueden ser importantes por su rol en la biodiversidad.

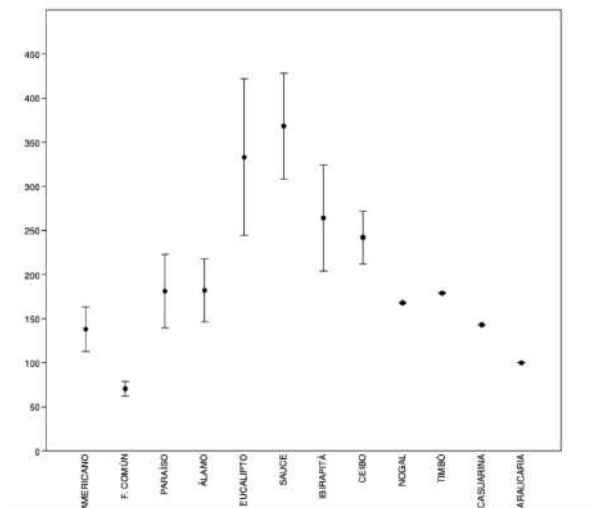


Figura 5: Media y desvío estándar de la circunferencia de los árboles agrupados por especie.

Comparación de la capacidad de almacenamiento de carbono entre árboles nativos y exóticos

La Figura 6 presenta la comparación de la capacidad actual de los árboles nativos y exóticos para almacenar carbono, para ello se ha de calcular el promedio de la capacidad de almacenamiento de carbono de los árboles nativos (3,4 tons) y el promedio de la capacidad de almacenar carbono de los árboles exóticos (1,3 tons) calculando también la desviación de los datos. En general se observa que los árboles nativos, que son en promedio más antiguos, han secuestrado una mayor cantidad de carbono en comparación con los árboles exóticos.

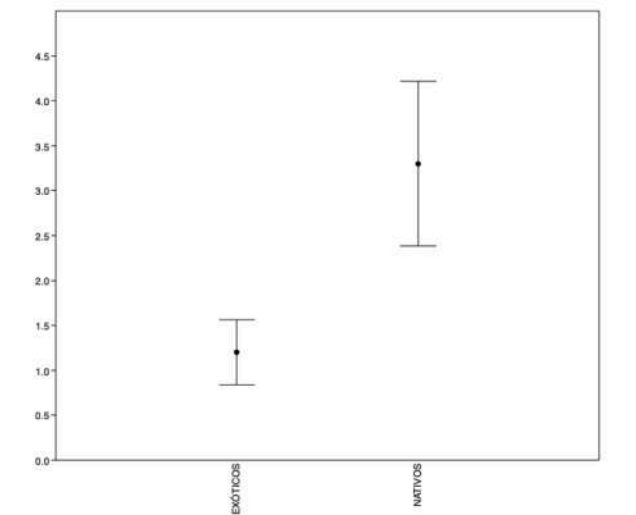


Figura 6: Capacidad de almacenamiento de carbono de árboles nativos y exóticos

La Figura 7 proyecta la cantidad de carbono que los árboles exóticos y nativos capturarán en los próximos 20 años. A diferencia del análisis de capacidad de almacenamiento de carbono actual, la proyección muestra que los árboles exóticos secuestrarán más carbono en el futuro. Esto sugiere que, aunque los árboles nativos son actualmente más efectivos en el secuestro de carbono, los árboles exóticos podrían desempeñar un papel crucial en la captura de carbono a largo plazo en la escuela.

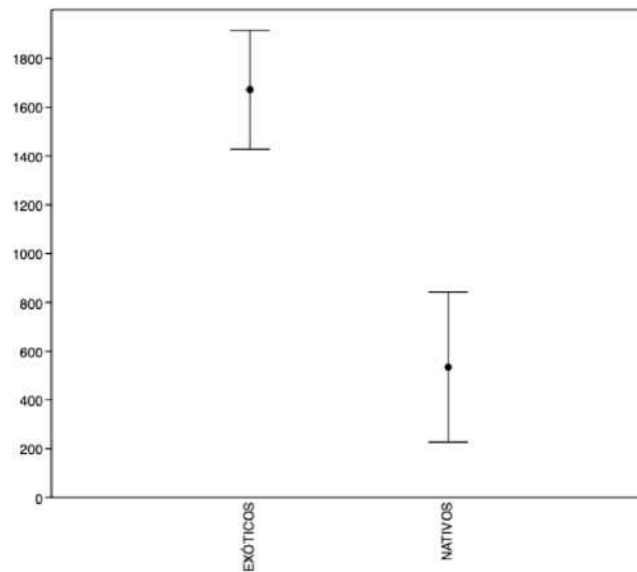


Figura 7: Proyección de carbono almacenado por los árboles nativos y exóticos en los Próximos 20 Años

La comparación entre la capacidad de almacenamiento de carbono de los árboles nativos versus los exóticos se hizo a través de una prueba para comparar las medias del carbono secuestrado entre los árboles nativos y exóticos. Esta prueba necesita que los datos se distribuyan normalmente, algo que ocurre con los árboles exóticos, que tienen mayor cantidad de ejemplares, pero que no se pudo probar para los árboles nativos, probablemente debido al pequeño número de ejemplares. Sin embargo, a este nivel hacer la prueba aún resulta interesante para probar la igualdad de la capacidad de los árboles nativos y exóticos para almacenar carbono. Los resultados de la prueba con un valor p de 0.021 a un alfa de 0.05 permiten sugerir que hay una diferencia significativa entre ambos grupos de árboles, con una mayor media de carbono secuestrado por los árboles nativos. Sin embargo, la proyección a 20 años sugiere que esta diferencia podría invertirse, dado el mayor crecimiento proyectado para los árboles exóticos.

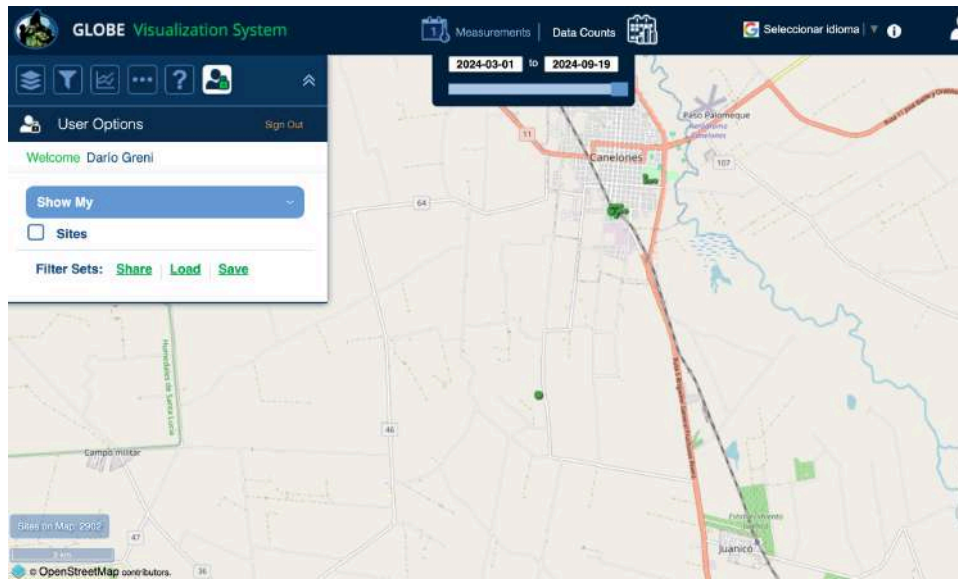


Figura 8: visualización de datos en la web de GLOBE.

DISCUSIÓN

Interpretación de Resultados

Los resultados de este estudio revelan diferencias significativas en la capacidad de secuestro de carbono entre los árboles nativos y exóticos presentes en el predio escolar. Los árboles nativos, debido a su mayor antigüedad y tamaño, han secuestrado más carbono hasta la fecha. Sin embargo, la proyección de 20 años sugiere que los árboles exóticos, que son más jóvenes y presentan un crecimiento más rápido, podrían superar a los nativos en términos de secuestro de carbono en el futuro. Esto resalta la importancia de una estrategia de manejo forestal que equilibre tanto la preservación de árboles nativos como la plantación de especies exóticas, maximizando así el secuestro de carbono en el largo plazo.

Posibles Fuentes de Error

Algunas posibles fuentes de error en este estudio incluyen la precisión de las ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa y, por ende, el carbono almacenado. Estas ecuaciones, aunque comunes, pueden no reflejar con total precisión la variabilidad específica de las especies y las condiciones del sitio de estudio. Además, la proyección a 20 años se basa en supuestos que pueden no coincidir completamente con las condiciones futuras, como posibles variaciones climáticas, enfermedades, o cambios en las prácticas de manejo forestal. Finalmente, el tamaño de la muestra, aunque representativa, puede no capturar toda la diversidad presente en otras especies y contextos similares.

Comparación con Estudios Similares

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos, como el de Van den Bor et al. (2023), que compararon los stocks de carbono en plantaciones de pino y bosques nativos de *Quercus* en España. Este estudio encontró que, aunque las plantaciones de pinos almacenan más carbono en la biomasa aérea debido a su rápido crecimiento, los bosques de *Quercus* tienden a almacenar más carbono en los compartimentos subterráneos, lo que los hace más resistentes a las perturbaciones como incendios y sequías (Castro, 2023). Este hallazgo es coherente con los resultados de nuestro estudio, donde se proyecta que los árboles exóticos, si bien capturarán más carbono en el futuro, podrían no ser tan resilientes frente a perturbaciones ambientales en comparación con los árboles nativos.

Además, un informe sobre la gestión forestal en áreas protegidas como Monfragüe subraya la importancia de considerar tanto la biodiversidad como el secuestro de carbono en las estrategias de manejo forestal. Al igual que en nuestro estudio, se destaca la necesidad de mantener una diversidad de especies, incluyendo árboles nativos, para asegurar la estabilidad del ecosistema a largo plazo y maximizar los beneficios ambientales (Castro, 2023).

Apoyo a la hipótesis

Los resultados del estudio apoyan parcialmente la hipótesis inicial. Si bien los árboles nativos han demostrado una mayor capacidad de secuestro de carbono en el presente, la proyección sugiere que los árboles exóticos podrían absorber más carbono en el futuro, debido a su rápido crecimiento. Esto matiza la hipótesis original y sugiere que una estrategia de reforestación y manejo forestal que combine especies nativas y exóticas podría ser la más efectiva para maximizar el secuestro de carbono y la resiliencia del ecosistema a largo plazo.

CONCLUSIONES

El análisis realizado hasta la fecha muestra que, en el presente, los árboles nativos tienen una mayor capacidad de secuestro de carbono en comparación con los árboles exóticos. Sin embargo, al proyectar el secuestro de carbono para los próximos 20 años, el análisis sugiere que esta tendencia se invertirá. Los árboles exóticos, debido a su rápido crecimiento y características de desarrollo, mostrarán un mayor incremento en la captura de carbono en comparación con los árboles nativos. Esto indica que, aunque actualmente los nativos son

más efectivos en el almacenamiento de carbono, los exóticos podrían superar esa capacidad en el futuro cercano, modificando la tendencia observada hasta el momento.

El estudio realizado ha permitido obtener resultados significativos y relevantes para la gestión forestal y la mitigación del cambio climático. A partir de las mediciones y análisis, se concluye que, en la actualidad, los árboles nativos, debido a su mayor tamaño y antigüedad, almacenan más carbono en comparación con los árboles exóticos. Esto es coherente con la literatura que resalta la capacidad de las especies nativas para adaptarse mejor a las condiciones locales, resistir plagas y enfermedades, y desempeñar un papel clave en la conservación de la biodiversidad.

Sin embargo, la proyección de secuestro de carbono para los próximos 20 años muestra que los árboles exóticos, que actualmente son más jóvenes, podrían superar a los nativos en términos de captura de carbono, debido a su rápido crecimiento. Este hallazgo sugiere que, aunque los árboles nativos tienen una ventaja en el presente, los exóticos podrían ser fundamentales para aumentar la capacidad de secuestro de carbono a largo plazo.

Las implicaciones de estos resultados son claras: una estrategia de manejo forestal óptima debería considerar una combinación de especies nativas y exóticas. Los árboles nativos deben ser preservados por su capacidad actual de secuestro de carbono y su contribución a la biodiversidad. Al mismo tiempo, los árboles exóticos deben ser manejados adecuadamente para aprovechar su rápido crecimiento y capacidad futura de captura de carbono. Esta combinación no solo maximizaría el secuestro de carbono, sino que también garantizaría la resiliencia del ecosistema a lo largo del tiempo.

Además, es importante destacar que cualquier proyección a largo plazo debe tomarse con cautela, dado que está basada en modelos que asumen condiciones climáticas y de crecimiento relativamente estables. Factores como el cambio climático, la gestión forestal y las plagas podrían afectar estas proyecciones. Por lo tanto, sería recomendable continuar el monitoreo y realizar ajustes en las estrategias de manejo en función de la evolución de los árboles y las condiciones ambientales.

Este proyecto ha demostrado ser una valiosa herramienta educativa, permitiendo a los estudiantes aprender sobre la importancia del secuestro de carbono, la biodiversidad y las prácticas sostenibles en el manejo forestal. A través de este tipo de proyectos, no solo se generan conocimientos científicos valiosos, sino que también se fomenta la conciencia ambiental y la acción en las futuras generaciones.

Estas conclusiones apoyan la hipótesis de que los árboles nativos actualmente secuestran más carbono, pero también matizan esta hipótesis al indicar que los exóticos podrían superar a los nativos en el futuro. Por lo tanto, la recomendación es adoptar una estrategia de reforestación y manejo forestal que combine ambos tipos de especies. Esto no solo maximizaría el secuestro de carbono a corto y largo plazo, sino que también contribuiría a la estabilidad y resiliencia del ecosistema, aprovechando las fortalezas de ambas categorías de árboles.

Finalmente, es importante reconocer las posibles fuentes de error en el estudio, como la precisión de las ecuaciones alométricas utilizadas y las proyecciones a largo plazo que dependen de supuestos sobre el crecimiento de los árboles y las condiciones ambientales futuras. A pesar de estas limitaciones, las conclusiones son coherentes con estudios similares y subrayan la necesidad de un enfoque equilibrado en la gestión forestal que valore tanto la biodiversidad como la eficiencia en la captura de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

Arhuire-Ossio, M., Vélez-Azañero, A., Quiros-Rossi, L., Thomas, E., & Ladd, B. (2022). Optimizing water use efficiency in urban green space of a hyper-arid megacity through tree species selection: a case study. *Urban Water Journal*, 20(10), 1331–1335. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2062009>

Barton, K., Keane, R., & Carey, S. (2018). **Impact of native tree species on carbon sequestration in tropical forests**. *Journal of Environmental Management*, 221, 122-130.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). **Special Report on Climate Change and Land**. Cambridge University Press.

Bor, B., Castro-Díez, P., & Alonso, Á. (2023). **Above and belowground carbon stock of pine plantations and native oak forests coexisting in central Spain**. *New Forests*. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-10011-z>

Brown, S., & Lugo, A. E. (1984). **Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes**. *Science*, 223(4642), 1290-1293.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., & Folster, H. (2005). **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. *Oecologia*, 145(1), 87-99.

FAO. (2020). **Global Forest Resources Assessment 2020**. *FAO Publications*.

Figueroa-Navarro, C., Etchevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Acosta-Mireles, M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de

la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 23(1),57-64.[fecha de Consulta 25 de Agosto de 2024]. ISSN: . Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57323108>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). **The State of the World's Forests 2020**. *FAO Publications*.

GLOBE (2005). Guía docente. UNA INTRODUCCIÓN AL CICLO DEL CARBONO.

GLOBE (2017). Tree Biomass & Carbon Analysis. Recuperado el 25 de agosto de 2024, de

<https://www.globe.gov/documents/355050/41927208/TreeBiomassCarbonAnalysis.pdf/6dad96c7-7b04-432b-b02e-1038a026062f>

GLOBE Program. (2023). **Tree Height Protocol**. Available from: [GLOBE Website].

IPCC. (2019). **Special Report on Climate Change and Land**. *Cambridge University Press*.

Köppen-Geiger Climate Classification. (n.d.). World map of the Köppen-Geiger climate classification. Retrieved September 17, 2024, from <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>

Pötzelsberger, E., Spiecker, H., Neophytou, C. et al. Growing Non-native Trees in European Forests Brings Benefits and Opportunities but Also Has Its Risks and Limits. *Curr Forestry Rep* 6, 339–353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00129-0>

Qian, J., Ji, C., Yang, J. et al. The advantage of afforestation using native tree species to enhance soil quality in degraded forest ecosystems. *Sci Rep* 14, 20022 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71162-3>

Richardson, D. M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D., & West, C. J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6(2), 93-107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). **The Paris Agreement**. *UNFCCC*.

Ventoso, A., & Mongiardino, C. (Eds.). (2023). *Guía de identificación de especies arbóreas nativas de Uruguay*. Ministerio de Ambiente.

Zeng, N., Qian, H., Munoz, J., & Iacobellis, S. (2020). **Carbon sequestration by reforestation in a changing climate**. *Nature Climate Change*, 10(3), 235-241.

ANEXO 1

Badges a los que se aplica:

1. I AM A DATA SCIENTIST

El proyecto sobre el secuestro de carbono incluye un análisis detallado de los datos recopilados tanto a nivel local como desde la base de datos de GLOBE. Se han creado tablas organizadas que presentan claramente los datos de biomasa y carbono almacenado, junto con gráficos que ilustran tendencias relevantes. Además, se ha realizado un análisis estadístico para interpretar los resultados y validar las conclusiones. El informe discute las limitaciones de los datos utilizados y cómo estas pueden influir en las conclusiones, así como propone investigaciones futuras. Con estos elementos, el proyecto demuestra un manejo riguroso de datos científicos.

2. I MAKE AN IMPACT

El proyecto ya establece una conexión directa entre un problema ambiental global, como el cambio climático, y soluciones prácticas a nivel local. A través de la investigación, se identificó el potencial de los árboles autóctonos para capturar carbono, lo que llevó a propuestas específicas, como fomentar la reforestación con estas especies en la región. Además, el informe describe cómo estas acciones generan conciencia ambiental en la comunidad escolar y contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático.

3. I AM A COLLABORATOR

El proyecto integra el trabajo colaborativo entre estudiantes, docentes y expertos, quienes contribuyeron al análisis y capacitación en técnicas avanzadas. Se han documentado claramente los roles y aportes de cada colaborador, resaltando cómo esta cooperación mejoró el desarrollo del proyecto. Este enfoque cumple con los requisitos de este badge, demostrando el valor del trabajo en equipo.

ANEXO 2

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas y organizaciones que contribuyeron al desarrollo de este proyecto, cuyo éxito no habría sido posible sin su apoyo y guía.

A la profesora **Claudia Caro**, por su valiosa orientación en la elaboración del informe. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para estructurar y presentar nuestra investigación de manera clara y profesional.

A **Andrea Ventoso**, por los talleres impartidos y por resolver nuestras consultas con paciencia y claridad. Sus aportes enriquecieron significativamente nuestra comprensión del tema y nuestras habilidades científicas.

A **Ana Prieto**, por su generosidad al responder nuestras preguntas relacionadas con los datos. Su experiencia y consejos nos permitieron analizar e interpretar la información de manera más precisa y efectiva.

A las familias de sexto, por su apoyo constante y su compromiso con nuestras actividades. Su participación activa y aliento nos inspiraron a dar lo mejor de nosotros en cada etapa del proyecto.

Finalmente, agradecemos a **LSQA** por certificar nuestro proyecto. Su reconocimiento nos motiva a seguir investigando y contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles para nuestra comunidad.

A todos ustedes, gracias por creer en nosotros y en nuestro trabajo. Este logro es de todos.

ANEXO 3

Certificado entregado por LSQA



Captura de pantalla desde la web: <https://lsqa.com.uy/Institucional/Clientes>