

Application of allometric equations for the sale of carbon credits from the reforestation of Cerro Piñujo, Huarmaca district in Peru

Patricia Katherine Bruno-Tineo¹, Claudia Catherine Caselima-Curay² y Napoleón Jáuregui-Nongrados³
^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00055520@upn.pe, n00061665@upn.pe y napoleon.jauregui@upn.pe

Abstract– Considering the Paris Agreement by the UN, the carbon credits generated by the reforestation of Mirador Cerro Piñujo were determined, this was possible through the application of the Allometric equations and Strand and quadrant techniques, as well as national and international experiences; the samples correspond to the study population, that is 22 Patula Pine trees planted in 2015 and 2019 and Radiata Pine from 2005, as well as 44 Patula Pine trees planted in 2018 and 9 Cypress trees from 2005. Resulting that this reforestation captures per year 5113.71 tons of CO₂, which valued at 50 US dollars per ton per year in the world market], resulted in 255. 667.50 US dollars, demonstrating a great economic opportunity for the district municipality of Huarmaca, owner of this reforestation, the same that can achieve by these revenues double in the coming years according to economic trends in the world market and having the said municipality vast tracts of land, should continue with reforestation and use them for these purposes and at the same time to contribute against climate change and sustainable development of its people.

Key words- Carbon credits, reforestation, allometric equations, municipality, sustainable development.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Aplicación de ecuaciones alométricas para la venta de créditos de carbono de la reforestación cerro Piñujo, distrito Huarmaca en Perú

Patricia Katherine Bruno-Tineo¹, Claudia Catherine Caselima-Curay² y Napoleón Jáuregui-Nongrados³

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00055520@upn.pe, n00061665@upn.pe y napoleon.jauregui@upn.pe

Resumen- Considerando el Acuerdo de París por la ONU, se determinó los créditos de carbono que genera la reforestación del Mirador Cerro Piñujo, ello fue posible mediante la aplicación de las ecuaciones Alométricas y técnicas Strand y del cuadrante, así como experiencias nacionales e internacionales; las muestras corresponde a la población de estudio, esto es 22 árboles de Pino Pátula sembrados en los años 2015 y 2019 y Pino Radiata del 2005, así también, 44 árboles de Pino Pátula sembrados en el año 2018 y 9 árboles de Ciprés del 2005. Resultando que esta reforestación captura al año 5113.71 toneladas de CO₂, que valorado a 50 dólares americanos la tonelada anual en el mercado mundial, resultó 255.667,50 dólares americanos, demostrándose una gran oportunidad económica para la municipalidad distrital de Huarmaca, propietaria de esta reforestación, la misma que puede lograr por estos ingresos el doble en los próximos años de acuerdo a las tendencias económicas de mercado mundial y teniendo la mencionada municipalidad vastos extensiones de terrenos, debería continuar con la reforestación y aprovecharlos con estos fines y al mismo tiempo para contribuir en contra del cambio climático y el desarrollo sostenible de su pueblo.

Palabras claves— Créditos de carbono, reforestación, ecuaciones alométricas, municipalidad, desarrollo sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales del mundo constituyen un importante recurso natural que brinda beneficios comerciales y servicios ecológicos, los bosques juegan un papel importante en el balance mundial de CO₂, las actividades humanas relacionadas con la forestación, reforestación y deforestación, así como la post-cosecha de biomasa maderal, que son los que en gran medida controlan el incremento del cambio climático [2]. Es así, que en la atmósfera la concentración del Dióxido de Carbono ha aumentado de manera alarmante en el último siglo, convirtiéndose en responsable de alrededor de tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Estos gases son nocivos para nuestro planeta, es por ello, que organismos como las Naciones Unidas vienen trabajando para acuerdos mundiales de reducción de emisiones GEI y la venta de créditos de carbono como medidas de lograr la estabilidad del cambio climático, créditos incluso provenientes de reforestación y otros, acordados por el Acuerdo de París en relación al Mecanismo de Desarrollo Limpio-MDL [1]. Es por ello, que en la actualidad la tonelada anual de CO₂ tiene un valor de crédito de carbono de 50 dólares americanos y puede alcanzar en los próximos años el doble [1].

El área de estudio es la zona de reforestación del mirador del Cerro Piñujo de propiedad de la Municipalidad distrital de Huarmaca, que está ubicado en el caserío Lanchepuquio, departamento de Piura en Perú. Esta reforestación, la municipalidad la realizó con el objetivo de protección de la cabecera de cuenca del cerro en mención del anexo Lanche Puquio, a fin garantizar el flujo de agua para la población, dado que tenían problemas de abastecimiento natural, esto fue a iniciativa propia de esta municipalidad, ya que, en el Perú no existe política pública obligatoria de reforestación. La Municipalidad de Huarmaca en el cerro Piñujo, plantaron tres tipos árboles, para el perímetro del mirador la especie Ciprés (*Cupressus*) y tanto las especies Pino Pátula (*Pinus Pátula*) y Pino Radiata (*Pinus Radiata*) para el interior de dicho mirador que tiene 15 hectáreas, cuyo espacio es utilizado como lugar recreativo gratuito para la población del entorno.

A pesar que la reforestación cumple un papel importante para la comunidad del distrito de Huarmaca, el mismo muy bien puede ser aprovechado para mayor contribución no sólo ambiental, sino para el desarrollo sostenible del distrito en mención, por ello, ¿Cuál es el potencial créditos de carbono que puede generar la reforestación del mirador cerro Piñujo de la municipalidad distrital de Huarmaca, en el año 2023?.

Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo determinar el potencial créditos de carbono de la reforestación del mirador cerro Piñujo, para lo cual se tuvo en consideración la metodología de aplicación de ecuaciones alométricas realizados por varios autores, como son [15], [16], [18] y [19]. Asimismo, es el caso de la investigación que evaluó la captura de CO₂ en plantaciones forestales de Eucalipto (*Eucalyptus Globulus*); Ciprés (*Cupressus Macrocarpa*) y Pino Radiata en una muestra de 2500 m² por especie; empleando el sistema no destructivo, y estimó el diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total por árbol donde los datos fueron sometidos a ecuaciones exponenciales, así como el Ciprés alcanzó un valor de 196.30 CO₂ t/ha, y Pino Radiata 315.56 CO₂ t/ha, mientras que la fijación neta anual de CO₂ en toneladas por hectárea fue de: 8.99; y 12.92 t/ha/año respectivamente [4]. También, se tomó en cuenta la investigación [5], en donde determinaron la reserva de carbono retenida bajo un sistema silvopastoril de *Pinus Pátula* en plantaciones jóvenes menores de diez años de edad, en sus resultados el carbono total promedio fue de 30.99 kg por árbol de Pino Pátula, lo que representa 113,60 kg de CO₂, alcanzando

el 42,70 % del total del sistema silvopastoril. También, se tiene que a mayor edad del árbol, este aumenta su capacidad de captura de CO₂ [28].

La determinación de créditos de carbono fue de un total de 5113.71 ton anuales, que calculado a 50 dólares americanos la tonelada, resultó un beneficio de 255667.50 dólares americanos, para lo cual se propuso se comercialice vía el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) que fomenta la ONU, tal y conforme también recomienda [6].

II. METODOLOGÍA

El tipo de diseño es experimental de tipo aplicada con uso de ecuaciones alométricas, para lo cual se utilizó las técnicas de observación, entrevista y análisis documental; mediante la observación se logró el inventario de árboles reforestados según sus especies en el Mirador Cerro Piñujo. Asimismo, se entrevistó al responsable de la reforestación en mención, que es el *Ingeniero Arturo Yen*. Por otro lado, para la determinación de los créditos de carbono, esto fue posible a través del análisis documental [7], ya que permitió el uso de las ecuaciones alométricas, los cuales se muestran en la tabla 2.

TABLA 1
FORMULARIO DE LAS ECUACIONES ALOMÉTRICAS

Fórmulas de ecuaciones alométricas		
Determinación de la altura (H)	$H = \text{Tang. (X)} * D$ [7]	Tang. (X) = tangente del ángulo en grados D = distancia (m)
Determinación del DAP	$DAP = \frac{C}{\pi}$ [8]	C = circunferencia $\pi = 3.1416$
Determinación del área basal (G)	$G = \frac{\pi * DAP^2}{4}$ [9]	$\pi = 3.1416$
Cálculo del Volumen (V)	$V = G * h * f$ [9]	G=área basal en m ² f = (0.7) h=Altura (m)
Densidad básica de la madera(Y)	$Y = 0.0134 + 0.8 * X$ [9]	X = densidad básica de la madera kg/m ³
volumen a biomasa del fuste (BF)	$BF = \frac{V * Y}{1000}$ [9]	V = volumen en m ³ Y = Ajuste de la densidad básica de la madera kg/m ³
Cálculo de biomasa total (BT)	$BT = BF * FEB$ [9]	BF = Biomasa del fuste (t) FEB = (3.4)
carbono aéreo total en toneladas(CAT)	$CAT = BT * 0.5$ [9]	BT = Biomasa (t)
Cálculo del carbono radicular (CR)	$CR = 0.24 * CAT$ [9]	CAT = Carbono aéreo total (t)
Cálculo del carbono total(CT)	$CT = CAT + CR$ [9]	CAT = Carbono aéreo total (t) CR = Carbono radicular (t)
Dióxido de carbono (CO ₂)	$CO_2 = CT * Kr$ [9]	CT =Carbono total (t) Kr = 44/12 = 3.67

Cálculo del valor económico del secuestro del CO ₂ (VE)	$VE = CO_2 * Ve$ [9]	Ve = Valor económico (US\$)
--	----------------------	-----------------------------

La determinación de la densidad de los árboles en campo, no fue posible por no tener la autorización de la Municipalidad de Huarmaca, por ello, fue determinado en base a las referencias que se detallan en la tabla 2.

TABLA 2
DENSIDAD ACTUAL DE ÁRBOLES SEGÚN AÑO DE SEMBRADO (kg/ m³)

Pino Pátula 2009	Pino Pátula 2015 y 2018	Pino Radiata 2005	Ciprés 2005
443 [11]	345[10]	290 – 420 =355 [15]	490 [18]
467 [12]	224.1[13]	422-406 =414 [16]	500 [19]
460.252 [13]		420 [17]	
520 [14]			
Promedio			
472.563	284.55	396.333	495

Para determinar la cantidad de muestras en el año 2023, por cada tipo de árbol del cerro Piñujo, se tomó en cuenta las técnicas Strand y del Cuadrante [20], cuyo resultado fue 22 árboles de Pino Pátula (para cada uno de los sembrados en los años 2015 y 2009) y 22 árboles de Pino Radiata (sembrado en el año 2005). Asimismo, 44 árboles de Pino Pátula (sembrado en el año 2018) y 9 árboles de Ciprés (sembrado en el año 2005), con estas muestras, se determinaron el diámetro a altura del pecho y la altura total del árbol. También para determinar el número de árboles por hectárea para cualquier especie, se consideró la ecuación (1) de [21].

$$\frac{\text{Perímetro del área de estudio}}{\text{Distancia entre árboles}} \quad (1)$$

Determinado la cantidad de árboles, fue posible conocer la captura en toneladas anuales de CO₂ al aplicar las ecuaciones alométricas y su valor de créditos de carbono, considerando su valor en el mercado mundial [1].

III. RESULTADOS

A. *Entrevista e inventario de la reforestación en el mirador del cerro Piñujo del distrito Huarmaca.*

De la entrevista al responsable de la reforestación del cerro Piñujo, en la persona del *Ingeniero Arturo Yen*, mencionó el año de sembrado de cada especie y el lugar que ocupan en todo el espacio del Mirador Cerro Piñujo, así como afirmó el objetivo de esta reforestación como medida de garantizar el flujo de agua para la población aledaña.

El inventario de la reforestación del mirador cerro Piñujo se presenta en la tabla 3.

TABLA 3
INVENTARIO DE LA REFORESTACIÓN DEL MIRADOR, CERRO
PIÑUJO

Hectárea	Año de plantación	Especie	Nombre científico
1	2015	Pino Pátula	<i>Pinus Pátula</i>
2	2018	Pino Pátula	<i>Pinus Pátula</i>
3	2009	Pino Pátula	<i>Pinus Pátula</i>
4	2005	Pino Pátula	<i>Pinus Radiata D.Don..</i>
Ciprés	2005	Ciprés	<i>Cupressus sp</i>

B. Determinación de las caracterizaciones de los árboles reforestados existentes en el mirador del cerro Piñujo del distrito Huarmaca.

Las características antes señaladas se presentan en la tabla 4.

TABLA 4
CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRBOLES DEL MIRADOR CERRO
PIÑUJO

Características	Árbol		
	Pino Pátula	Pino Radiata	Ciprés
Especie	Pino Pátula	Pino Radiata	Ciprés
Familia	Pinaceae	Pinaceae	Cupressaceae
Nombre científico	<i>Pinus Pátula</i>	<i>Pinus Radiata D. Don</i>	<i>Cupressus lusitanica</i>
Orden	Pinales	Coniferales	Pinoles
Nombre común	Pino Pátula, Pino Espátula, Barbas De Chivo, Pino Llorón	Pino Radiata, Pino Monterrey, Pino Insigne	Ciprés
Condición según origen	Introducida	Introducida	Introducida
Año de plantación	2009	2005	2005
	2015		
	2018		
Edad	14 años	18 años	18 años
	8 años		
	5 años		
Extensión de plantación	2.6536 ha (2009)	2.6015 ha (2005)	1806.23 ml (2005)
	2.8121 ha (2015)		
	3.8569 ha (2018)		
Hojas	perennifolia	perennifolio, sus hojas se presentan en grupos de 3, siendo la diferencia de otros Pinus, ya que en otras especies nacen en pares de 2.	pequeña hoja escamiforme, perenne de color verde
Asociación vegetal en el mirador	Simbiosis con hongos y líquenes	Simbiosis con hongos y líquenes	Simbiosis con hongos y líquenes

Siembra	Tres bolillo con linderaciones de predio con un distanciamiento de 3 m x 3 m	Tres bolillo con linderaciones de predio con un distanciamiento de 3 m x 3 m	Tres bolillo con linderaciones de predio con un distanciamiento de 3 m x 3 m
Objetivo de la plantación	Turismo, cobertura vegetal contra erosión; ayuda a la infiltración del agua (acuíferos), y funciona como atrapa niebla	Turismo, cobertura vegetal contra erosión, ayuda a la infiltración del agua (acuíferos), y funciona como atrapa niebla	Turismo, cobertura vegetal contra erosión, ayuda a la infiltración del agua (acuífero), funciona como atrapaniebla y cerco vivo.
mantenimiento	Poda, desbroche y desbroce	Poda, desbroche y desbroce	Poda, desbroche y desbroce
Tronco	recto y cilíndrico	cónico y recto.	recto
Corteza	corteza papirácea, escamosa y de color rojizo en la parte superior del tallo y en las ramas	Corteza externa café agrietada; corteza interna crema.	Corteza de color gris, desprendible en bandas largas y estrechas, resinosas
Hojas	hojas en grupo de 3 y a veces 4, delgadas, verticalmente caídas, color verde claro brillante.	Hojas aciculares en fascículos de tres, verde oscuras	hojas imbricadas, escamosas, verde oscuras y triangulares
Flores	Flores masculinas con estambre peltados, las femeninas se encuentran en conos o estróbilos.	Posee tanto flores masculinas como femeninas, siendo las últimas presentadas como conos.	Flores masculinas y femeninas en el mismo árbol. Las primeras presentan forma cilíndrica. las flores femeninas tienen forma de cono o piña .
Fruto	leñoso, grande parecido a una piña, contiene semillas aladas largamente cónicos, por lo general agrupados de 3 a 6. semillas aladas	Fruto cono o estróbilo leñoso, grande parecido a una piña, contiene semillas aladas.	fruto femeninos o gálbulos muy redondeadas y de textura leñosa
Altura de la plantación	2800 M.S.N.M	2800 M.S.N.M	2800 M.S.N.M
Precipitación anual en Huarmaca	532.8 mm	532.8 mm	532.8 mm
Temperatura promedio de Huarmaca	10-20 °C	10-20 °C	10-20 °C

Zona de siembra	El lugar se caracteriza por la abundante neblina(especialmente en invierno)	El lugar se caracteriza por la abundante neblina(especialmente en invierno)	El lugar se caracteriza por la abundante neblina(especialmente en invierno)
------------------------	---	---	---

Asimismo, se determinó el total de árboles por especie en el Mirador cerro Piñujo, la misma que se presenta en la tabla 5.

TABLA 5
TOTAL DE ÁRBOLES EN EL MIRADOR CERRO PIÑUJO

Tipo de árbol	Año de plantación	Cantidad
Pino Patula	2009	2948
Pino Patula	2015	3124
Pino Patula	2018	5685
Pino Radiata	2005	2890
Ciprés	2005	602

C. *Determinación mediante ecuaciones alométricas la captura de CO₂ de la reforestación del mirador cerro Piñujo del distrito Huarmaca.*

Mediante las ecuaciones alométricas, se logró determinar el carbono total en tonelada por especie y por el total de hectáreas, haciendo la salvedad que de la especie Ciprés sembrado sólo en el contorno perimetral del mirador del cerro Piñujo, se convirtió los metros lineales a hectáreas, aplicando la técnica Strand fue 1806.23 m x 3 m lineales de uso de suelo, resultando 0.541869 ha y para las otras especies se utilizó la técnica del Cuadrante. Los resultados se muestran como tal en la figura 1.

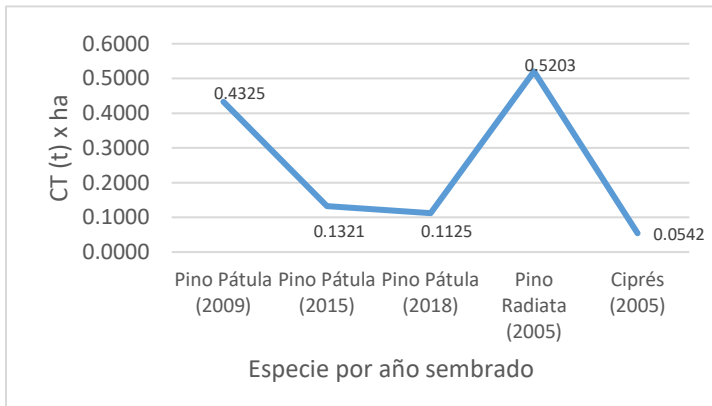


Fig. 1 Carbono total en t x ha por especie sembrado.

En la tabla 6, se muestra el resumen de los cálculos alométricos.

TABLA 6
RESUMEN DE CÁLCULOS CON ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LAS ESPECIES REFORESTADAS EN EL MIRADOR CERRO PIÑUJO

Árbol	Pino Patula	Pino Radiata	Ciprés
-------	-------------	--------------	--------

Años de plantación	2009	2015	2018	2005	2005
DAP(m)	0.18	0.16	0.137	0.178	0.135
Área basal (m²)	0.025	0.022	0.016	0.025	0.014
Volumen (m³)	0.204	0.098	0.047	0.3	0.119
Densidad de la madera (kg/m³)	472.563	284.55	284.55	396.33	495
Biomasa del fuste (t*)	0.077	0.022	0.011	0.095	0.047
Biomasa Total (t*)	0.262	0.076	0.036	0.323	0.161
Carbono Aéreo Total (t*)	0.262	0.076	0.036	0.162	0.08
Carbono Radicular (t*)	0.031	0.009	0.004	0.039	0.019
Carbono total (t*)	0.163	0.047	0.022	0.200	0.100
Carbono total (ha)	1.5841	0.4864	0.4196	1.9147	0.541869
CO₂ total (t*)	0.597	0.173	0.082	0.736	0.365
CO₂ total (t)x ha	1.15841	0.4864	0.4196	1.9147	0.1978

Utilizando las muestras definidas en la metodología, se aplicaron en las ecuaciones alométricas a fin de determinar el total de Dióxido de Carbono capturado por especie de árbol reforestado en el mirador cerro Piñujo, los cuales se presentan en la tabla 7, que se desprenden de la tabla 6.

TABLA 7
TOTAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) CAPTURADO POR ESPECIE EN (t/año).

Especie por año sembrado	Cálculo	CO ₂ (t/año)
Pino Pátula (2009)	0.597 t/árbol x 2948 árboles	1759.96
Pino Pátula (2015)	0.173 t/árbol x 3124 árboles	540.45
Pino Pátula (2018)	0.082 t/árbol x 5685 árboles	466.17
Pino Radiata (2005)	0.736 t/árbol x 2890 árboles	2127.04
Ciprés (2005)	0.365 t/árbol x 602 árboles	219.73
TOTAL		5113.71

De la tabla 7, se demuestra que la especie de mayor captura de CO₂ al año, corresponde a la especie Pino Radiata, que fue sembrado en el año 2005.

D. *Determinación de los créditos de carbono de la reforestación del mirador Cerro Piñujo*

Tomando en cuenta [1], el valor anual por tonelada de CO₂ secuestrada es de US\$ 50 dólares al año 2023, con proyección al 2030 de US\$ 100 dólares. Por lo que, sólo se ha considerado el primer valor, en la tabla 8 se presenta la valorización por especie de árbol y el total en moneda Dólar Americano.

TABLA 8
VALORIZACIÓN ECONÓMICA DEL SECUESTRO DE T_n DE CO₂ POR AÑO EN DÓLARES AMERICANOS

Especie	Toneladas de CO ₂ /año	Venta en US\$/año
---------	-----------------------------------	-------------------

Pino Pátula- 2009	1759.96	87, 998.00
Pino Patula - 2015	540.45	27,022.50
Pino Pátula - 2018	466.17	23,308.50
Pino Radiata- 2005	2127.04	106,352.00
Ciprés-2005	219.73	10,986.50
Total		255,667.50

De la tabla 8, la especie Pino Radiata es la que genera mayor ingreso por venta de CO₂, esto debido a que es la especie que existe en mayor cantidad y mayor edad en cuanto a su reforestación en el cerro Piñujo.

E. Propuesta de venta de los créditos de carbono en el mercado internacional para la sostenibilidad de la municipalidad distrital de Huarmaca.

La venta de los créditos de carbono, se proponen sea vía el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), promovido por la ONU con gran ventaja de aseguramiento económico para la municipalidad distrital de Huarmaca, quien será beneficiada y debe presentar el proyecto a través del Fondo Nacional del Medio Ambiente ante al Ministerio del Ambiente, quien a su vez presentara el proyecto aprobado ante la ONU, quien tiene sus propios mecanismos de verificación y certificación, y por lo demostrado en la investigación, es seguro se logre la venta del carbón capturado por los árboles reforestados del cerro Piñujo porque cumplen con los requisitos del Acuerdo de París. De esta manera, los árboles reforestados en el cerro Piñujo no sólo contribuyen con la sostenibilidad de asegurar agua para el entorno que carece del mismo y por el cual fueron sembrados, sino que también contribuyen en la reducción de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo en la mejora económica del distrito de Huarmaca, dado que permiten fuentes de ingresos por la venta de su captación de CO₂ a través de los créditos de carbono.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio tuvo limitaciones para conocer el periodo de reforestación del cerro Piñujo, puesto que no existe registro documental en los archivos de la Municipalidad distrital de Huarmaca, la misma que fue corroborado en la entrevista con el responsable de esta reforestación, a quien se tuvo que aceptar la versión de los hechos de esta reforestación. Otra limitante fue la imposibilidad de determinar las densidad de los árboles del cerro Piñujo, puesto que no se tuvo la autorización por parte de la Municipalidad distrital de Huarmaca para efectos destructivos en campo, esta limitación se superó considerando las densidades obtenidas por otros autores, que tomaron como muestran árboles de la misma especie que se trabajó en ambientes similares del Cerro Piñujo, como ultima limitación, no se contó con equipos especializados para medir la altura de los árboles, esta limitante fue superada con determinación de forma empírica, esto es considerando ecuaciones alométricas,

cuyos resultados son aceptables por tener un error bajo de 5%. De la tabla 1 que corresponde a los detalles de las especies, se precisa el año de sembrado y nombre científico que las plantaciones en el mirador del cerro Piñujo, que a partir del cual se estudió a cada especie sembradas a fin de determinar la captación de CO₂ y su valorización económica de acuerdo al valor de mercado [1]. En la tabla 2, se muestra el detalle de las ecuaciones alométricas que permitieron determinar la captura anual de CO₂, tal como lo demostró [22]. De la tabla 3, se muestra la densidad promedio por especie de árbol, considerando las experiencias de [23], [24] y [25]; tomado para Pino Patula [15] y tomado para Pino Radiata [16]; así como tomado para Cipres [18] y [19]. En la tabla 4 se identificó la caracterización de cada especie de árbol reforestado en el cerro Piñujo, que permitió contar con la data para determinar la cantidad de árboles reforestados, cuyos resultados se muestran en la tabla 5, para lo cual, se aplicó ecuaciones alométricas y las técnicas Strand y del Cuadrante [20]. De esta manera, en la figura 1 se demuestra el total de carbono capturado por cada especie de árbol del presente estudio y cuyos valores son idénticos a lo obtenido por [4], [5] y [22]. De las tablas 6 y 7, se determinaron el promedio de carbono total, para cada árbol reforestado y la cantidad de dióxido de carbono y cuyos resultados son similares a lo obtenido tanto por [4] y [5]. Finalmente, en la tabla 8, se logró la valorización económica del secuestro en toneladas de CO₂ al año en dólares americanos, considerando el valor de mercado [1], el cual muestra un resultado alentador para la mejora económica de la Municipalidad distrital de Huarmaca, que es la propietaria de los árboles reforestados en el mirador cerro Piñujo; en donde se precisa mayor índice de valorización económica en la especie de Pino Radiata que corresponde al año de siembra 2005, y cuyo resultado es semejante a lo obtenido en la investigación que comprende el análisis de 1972 árboles de Pinus Radiata de 11 años de edad y utilizó las ecuaciones alométricas [26], de lo cual se desprende que el árbol de mayor importancia de captura de CO₂ en este cerro indicado es el Pino Radiata. De los resultados, se desprende que los árboles del cerró Piñujo, aún pueden captar mayor cantidad de CO₂ por ser aún jóvenes, conforme a la teoría de [28]. Por lo que, el valor de US\$ 255,667.50 dólares americanos obtenido en la tabla 8 como producto de la determinación de créditos de carbono, generado de la reforestación del mirador cerro Piñujo, puede muy bien incrementarse, dado que los árboles mencionados pueden en el tiempo incrementar su capacidad de captura de CO₂ y al mismo tiempo, el valor de venta aumentaría significativamente, puesto que, el valor de créditos de carbono se incrementará en el doble del presente para el año 2030 [1]. En tal sentido, con esta investigación se evidencia que la Municipalidad de Huarmaca tiene una gran oportunidad de mejora económica con uso de la reforestación que hizo en el mirador cerro Piñujo y lo puede canalizar a través del Ministerio del Ambiente para finalmente poder vender los créditos por medio de la ONU mediante el proceso del Mecanismo de Desarrollo Limpio, que viene desde el Protocolo de Kyoto y está vigente a la fecha, de cuya venta

servirá para promover a nivel nacional e internacional que otras municipalidades de países en desarrollo tengan en cuenta esta oportunidad de mejora económica para sus pueblos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la aplicación de ecuaciones alométricas se logró determinar las caracterizaciones de los árboles reforestados existentes en el mirador del cerro Piñujo del distrito Huarmaca que ocupa 15,50 ha, todos ellos en buen estado y aún jóvenes, conformado por las especies Pino Pátula, Pino Radiata y Ciprés, de los cuales prevalece la captación de CO₂ la especie Pino Radiata y en total se determinó 5113.71 t/año de captura de CO₂ por estos árboles y considerando el valor de mercado actual de créditos de carbono [1], se obtuvo el valor de 255,667,50 dólares americanos al año; el mismo que muy bien puede ser mayor en el tiempo, dado que los árboles del estudio pueden aún madurar e incrementar su captación de CO₂ y porque el valor de los créditos de carbono cada vez se incrementan en el mercado internacional. Por lo tanto, la Municipalidad distrital de Huarmaca tiene una gran oportunidad de mejora económica, si vende los créditos de carbono determinados de la reforestación hecha en el cerro Piñujo, para lo cual se recomienda sea mediante el procedimiento del Mecanismo de Desarrollo Limpio que promueve la ONU y para mayor venta de créditos de carbono debería dicha municipalidad ampliar la reforestación en su zona, como es incluso aprovechando sus árboles nativos en beneficio de su desarrollo sostenible, de cuya experiencia debería otras municipalidades continuar con esta actividad y al mismo tiempo, el Ministerio del Ambiente del Perú debería tener en cuenta como política pública para promover y facilitar a las municipalidades implementen estas actividades de reforestación para venta de créditos de carbono.

RECONOCIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte, por el patrocinio de esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Banco Mundial. *Fijación del precio del carbono*, <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/carbon-pricing>.

[2] Van Kooten, G.; & Johnston, C. *The economics of forest carbon offsets. Annual Review of Resource Economics*, 8, 227-246, 2022 <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-resource-100815-095548>.

[3] Cristina, N. *¿Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos?* *Revista NAT GEO, medio ambiente*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-hacen>

[4] Yantaz T. *Estimación del nivel de captura de dióxido de carbono del eucalipto (eucalyptus globulus), Ciprés (cupressus macrocarpa) y Pino (pinus Radiata), en la localidad de Huariaca, Pasco – 2019 [tesis de maestría, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]*, 2022. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2646/4/T026_40424014_M.pdf

[5] Oliva Manuel, Culqui Mirano, L., Roicer Collazos L., Salas, Rolando, Vásquez, Héctor V., y Maicelo Quintana, J., L. *Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de Pinus Pátula y herbáceas nativas.*

Scientia Agropecuaria, 8(2), 149-157. 2017 <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>

[6] Oviedo, B. *La COP 26 y el artículo 6 del Acuerdo de París*. *Peruweek*. 2021, <https://www.peruweek.pe/la-cop-26-y-el-articulo-6-del-acuerdo-de-paris/>

[7] Rüginitz, M. T., Chacón, M. L. y Porro R. Guía para la *Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA)*. 2009. 79 p. https://www.researchgate.net/publication/259176045_Guia_para_la_determinacion_de_carbono_en_pequeñas_propiedades_rurales

[8] Masias, M. *Consideraciones para la medición de diámetros y alturas de arboles vivos de Polylepis flavipila (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb.[Tesis de titulación, universidad nacional agraria la molina]*, 2017 <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3458/K10-M37-T.pdf?sequence=1>

[9] Gonsalo, S. *Valoración económica del secuestro de CO2 en plantaciones De Simarouba amara (Aublet) "marupa" y Cedrelinga cateniformis (Ducke) "tornillo" en el ciefor, puerto almendra [Tesis de titulación, Universidad nacional de la Amazonia Peruana]*, 2013 https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4921/Sergio_Tesis_Titulo_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[10] Goche, J; Velázquez, A; Borja de la Rosa, A; Capulín, J; & Palacios, C. *Variación radial de la densidad básica en Pinus Pátula Schltdl. et Cham. de tres localidades en Hidalgo. Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(7), 71-78. 2011, https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000500006&script=sci_arttext#a6t1

[11] Ospina, C.; Hernández, R.; Andre, R.; Sanchez, F.; Urrego, J.; Rodas, P.; Ramirez, C. y Riaño, N. *Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. Obtenidoguía_pinus.pdf* (cenicafé.org)

[12] Vázquez-Cuecuecha, Oscar G., Zamora-Campos, Eunise M., García-Gallegos, Elizabeth, y Ramírez-Flores, Juan Alberto. *Densidad básica de la madera de dos Pino s y su relación con propiedades edáficas. Madera y bosques*, 21(1), 129-138. 2015 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100010&lng=es&tlng=es.

[13] Goche, J; Velázquez, A; Borja de la Rosa, A; Capulín, J; & Palacios, C. *Variación radial de la densidad básica en Pinus Pátula Schltdl. et Cham. de tres localidades en Hidalgo. Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(7), 71-78. 2011 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000500006&script=sci_arttext#a6t1

[14] Alava, M y Solarte, S. *Estudio de las propiedades mecánicas de las maderas guayacán trébol, quiebra filo, chanul, Pino Pátula, sande, y su relación con la densidad básica*. 2023, <https://sired.udenar.edu.co/2042/>

[15] Barría, C., Sandoval, S., y Rojas, G. *Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de Pinus Radiata. Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), 349-362. 2017 https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2017000300010&script=sci_arttext

[16] Bahamonde, M. *Análisis del comportamiento de la densidad básica de la madera de Pinus Radiata D. Don en rodales de distinta productividad [Doctoral dissertation, Universidad Austral de Chile]*. 2012 <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/18362>

[17] Calderón, E. *La madera Pino Radiata y su agrupamiento estructural según norma E010-Huánuco Perú*, 2022, <https://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/8425>

[18] Osis, D. & Muñoz, A. *Determinación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera Eucalipto (Eucalyptus globulus), Pino (Pinus Radiata) y Ciprés (Cupressus lusitanica), para su uso como Material Estructural y su Aplicación al Diseño de un Tijeral Par y Nudillo, Abancay-Apurímac*. 2022, <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1147>

[19] Herrera, S. *Factibilidad de la implementación de elementos estructurales, cruces de San Andrés utilizando madera de la zona como aliso o Ciprés para la nueva casa comunal del barrio Yugsiche Alto, parroquia Toacaso, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil)*, 2022 <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34698>

- [20] Moscovich, F. A., y Brena, D. A. *Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de Araucaria angustifolia Bert. O. Ktze. Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, (13), 7-16. 2006, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101301>
- [21] Hernandez, J. Garcia, J. Muñoz, H. Garcia, X., Sáenz, T., Flores, C. & Hernandez, A. *Guía de densidad para manejo de bosques naturales de Pinus Teocote Schlecht. et cham. en hidalgo*, 2012, <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n19/v4n19a6.pdf>
- [22] Gonzalo, S. *Valoración económica del secuestro de CO₂ en plantaciones de Simarouba Amara (Aublet) "Marupa" y Cedrelinga Cateniformis (Ducke) "tornillo" en el Ciefor, Puerto Almendra, Iquitos – Perú*. 2013, <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4921>
- [23] Riesco, G., y Díaz, J. *Características físicas de la madera de Pino procedente de raleos en el noroeste de España. Maderas. Ciencia y tecnología*, 9(3), 233-244, 2007, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2007000300004>
- [24] Alava, M y Solarte, S. *Estudio de las propiedades mecánicas de las maderas guayacán trébol, quiebra filo, chanul, Pino Pátula, sande, y su relación con la densidad básica*. 2023, <https://sired.udenar.edu.co/2042/>
- [25] Vázquez-Cuecuecha, Oscar G., Zamora-Campos, Eunise M., García-Gallegos, Elizabeth, y Ramírez-Flores, Juan Alberto. *Densidad básica de la madera de dos Pino s y su relación con propiedades edáficas. Madera y bosques*, 21(1), 129-138, 2015, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100010&lng=es&tlng=es.
- [26] Bernachea, N. *Valoración económica y secuestro de CO₂ en bosques plantados de eucalipto (eucalyptus globulus labil) y Pino (pinus Radiata) de 11 años de edad en Cochatama, distrito Huacar, provincia ambo departamento Huánuco – setiembre. [Tesis de titulación, universidad de Huánuco]*, 2019, <http://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/1776;jsessionid=36018B283A9FED30AB24DE378D96D509>
- [27] Barría, C., Sandoval, S., y Rojas, G. *Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de Pinus Radiata. Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), 349-362. 2017 https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2017000300010&script=sci_arttext.
- [28] Mollocondo & Aguilar. *Estimación de la captura de CO₂ en plantaciones forestales de Polylepsis sp, Cupressus spp y Eucaliptus globulus, para mitigar el cambio climático en el Centro de Producción San Juan de Potojani – Puno*, 2018. (2019), https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/1742/Mery_Tesis_Licenciatura_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y