

04-029

Equations allometric to estimate the capacity of capture of carbon in three basins of the central coast of the Peru

Alexis Dueñas Dávila

Universidad Nacional Federico Villarreal;

Climate change is one of the most complex environmental problems facing humanity and is expressed in the increase of the average temperature as a result of the issuance of significant amounts of carbon and gases (NO_x, SO_x, methane). One way to remedy this is through carbon sequestration. This research aims to estimate the capacity of carbon sequestration in three basins of the central coast of the Peru, through the relationship between primary biomass production and effective rate of CO₂ storage, This research aims to estimate the capacity of carbon sequestration in three basins of the central coast of the Peru, through a design of segmentation of basins with sampling of components tree, shrub and canopy. Thus it was determined that the potential capture in the basin of the river Lurín is 32 932 tCO₂/year, in the basin of the rio Chancay 14 038 tCO₂/year and in the basin of the river Mala 18 2010 tCO₂/year, which as a whole would explain a screenshot of 65 171 tCO₂/year and whose monetary value is \$ 365 127 dollars, for the condition of improvement, whereas projects with CDM and 357 136 US, per year for the current condition.

Keywords: Vegetal biomass; Capture of CO₂; Equations Allometric

Ecuaciones alométricas para estimar la capacidad de captura de carbono en tres cuencas de la costa central del Perú

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más complejos que enfrenta la humanidad y se expresa en el aumento de la temperatura media como consecuencia de la emisión de importantes volúmenes de carbono y gases (NO_x, SO_x, metano). Una forma de remediar este problema es por medio del secuestro de carbono. La presente investigación tiene por objetivo estimar la capacidad de captura de carbono en tres cuencas de la costa central del Perú, a través de la relación entre la producción primaria de biomasa y la tasa efectiva de almacenamiento de CO₂, por medio de un diseño de segmentación de cuencas con toma de muestras de componentes arbóreo, arbustivo y de dosel. De ese modo, se determinó que la captura potencial en la cuenca del río Lurín es de 32 932 tCO₂/año, en la cuenca del río Chancay 14 038 tCO₂/año y en la cuenca del río Mala 18 2010 tCO₂/año, que en su conjunto explicarían una captura de 65 171 tCO₂/año y cuyo valor monetario es de 357 136 US, por año para la condición actual y de \$ 365 127 dólares americanos, para la condición de mejora, considerando proyectos con MDL.

Palabras clave: Captura de CO₂; Ecuaciones alométricas; biomasa vegetal

Correspondencia: Alexis Dueñas alexis_duenas@yahoo.com



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Introducción

El cambio climático es uno de los problemas ambientales que afecta al mundo y una de sus expresiones es el calentamiento global, que se traduce en la variación promedio de la temperatura ambiental (Garduño, 2004). Este problema se manifiesta a escala global y se relaciona con el crecimiento económico y en particular con la forma, que el hombre, utiliza los recursos naturales (Peralta, 2016; García-Torres, Kahhat, & Santa-Cruz, 2016; Bermejo, et al, 2010; Gore, 2010; Carpintero, 2007). Esta situación ha recibido la atención de los principales foros mundiales, entre ellos de las conferencias mundiales sobre el cambio climático (Lima-2015 y París-2016), con la finalidad de diseñar propuestas de mitigación y/o adaptación en los niveles productivos y demográficos (Zanetti, et al, 2017; Fujimori, et al., 2017; Vázquez-Rowe, et al, 2016; Peralta, 2016; Barton & Irarrázaval, 2016).

Parte de este problema radica en la naturaleza del desarrollo tecnológico y que se tradujo en el incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera (Schneider, *et al.*, 2017; Vanuytrecht & Thorburn, 2017; IPCC, 2001; Garduño, 2004), y está asociado a la deforestación, emisiones generadas por la producción de cemento y cambio en los usos del suelo (Arneth, et al., 2017; Walsh, et al., 2017; Sands & Suttles, 2017; Grace, 2004; Nebel & Wriqth, 1996). Tal como lo señala McCarthy (2001), el calentamiento global afecta al tamaño de la población, la distribución y composición de las especies, así como en su estructura y funcionamiento. Todo ello tiene incidencia en la producción primaria y el índice de efectividad fotosintética (Restrepo-Coupe, et al., 2017; Sung, et al, 2016; Mekonnen, Grant, & Schwalm, 2016; Liu, et al, 2016; Ceuleman, Janssens, & Jach, 2001; McCarthy, 2001; Bradley, 1999; Martin, 2001; Moss, Oswald, & Baines, 2001).

En este contexto, hay un renovado interés por la captura de carbono como una consecuencia del Protocolo de Kyoto y más específicamente de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) y los Certificados de Emisiones (CE). Ambos instrumentos propiciaron el surgimiento del “mercado de carbono” (Márquez, 2000). Países con importantes áreas forestales y asociaciones silvo-pastoriles tienen una oportunidad en el mercado de “bonos de carbono” y cuyas regalías podrían contribuir al desarrollo de poblaciones locales, básicamente en el medio rural (Pagiola, Landell-Mills, & Bishop, 2003).

El Perú tiene extensas áreas forestales, pastos naturales y agro-ecosistemas, cuyos servicios ambientales no han sido valorados, entre ellos la captura de carbono (Feijóo, et al, 2016; Stout, Lal, & Monger, 2016; Pagiola, Landell-Mills, & Bishop, 2003). Por tanto, la estimación de la captura potencial de carbono en cuencas de la costa central del Perú es importante porque permite determinar el valor económico de este servicio y con ello estimar la contribución económica con proyectos de desarrollo limpio.

La literatura especializada señala que una forma de reducir de las emisiones CO₂ es el incremento de la captura de carbono (Brown, 1997; Husch, 2001) y con ello, la conservación de sistemas naturales, como el llano amazónico. Sin embargo, la Amazonía, que alberga una extensa área forestal, no es la única región con una atractiva captura de carbono. Sistemas naturales y secundarios en la costa, por ejemplo, podrían ofrecer alternativas igualmente atractivas en la transformación de CO₂ en biomasa.

Lo anteriormente descrito requiere de una aproximación integral, por lo que se hace necesario conocer, en condiciones de campo, la capacidad de captura potencial en diferentes asociaciones vegetales (Stout, Lal, & Monger, 2016; Arneth, *et al.*, 2017). A la fecha se dispone de hasta tres técnicas para estimar la captura de carbono. La primera de ellas, consiste en el análisis de ejemplares que se extraen de sistemas forestales o agroforestales por medio del “muestreo destructivo” de especímenes y

determinar, en laboratorio, la concentración de carbono. Una segunda técnica es el uso de ecuaciones alométricas para determinar la productividad primaria y con ello aproximarse a las tasas de captura de carbono (Lupi, et al., 2017; Waring & Powers, 2017; Diédhiou, et al., 2017; Nath, et al, 2017). Una tercera opción requiere de sensores remotos y fotografías satelitales para determinar el contenido de carbono encima de la superficie del suelo.

Objetivos

El trabajo de investigación, cuyos resultados se presenta, tiene como objetivo central obtener ecuaciones alométricas con base en el estudio de parámetros referidos a la densidad de especímenes, altura de planta y diámetro en diversas asociaciones vegetales (arbóreas, arbustivas y de dosel) que se ubican en cuencas de la zona árida de la costa peruana, con el propósito de obtener la producción de biomasa y a través de ella, estimar la captura potencial de carbono.

Metodología

La investigación, que se expone, se sustenta en un modelo de estimación de captura de carbono, que se aplica tanto a ecosistemas naturales como a agro-ecosistemas, al correlacionar la producción primaria con la tasa de almacenamiento o contenido de carbono en la biomasa. De ese modo, el estudio se realizó en la costa central del Perú, en las cuencas de los ríos: Chancay, Lurín y Mala, que tienen importancia económica y ambiental (bosques, red hidrográfica y zonas de vida) de la región Lima, tal como se aprecia de la figura 1.

Figura 1: Características básicas de las cuencas del departamento de Lima

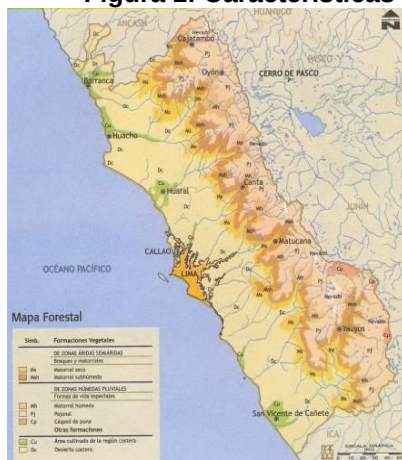


Figura 1-A: Mapa forestal de las cuencas del departamento de Lima.



Figura 1-B: Mapa hidrográfico de las cuencas del departamento de Lima.

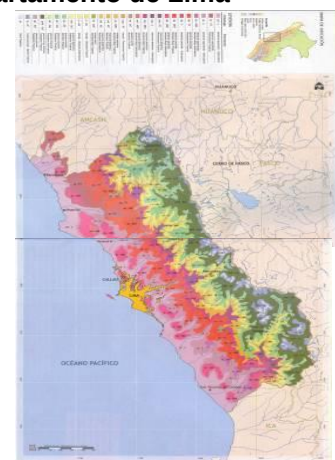


Figura 1-C: Mapa de zonas de vida del departamento de Lima

La selección de la muestra, de índole no probabilística, se realizó tomando en consideración la extensión de cada cuencas; estableciendo la distinción en sus componentes vertical (cuenca alta, media y baja), como horizontal (vertiente derecha e izquierda). Se utilizó la zonificación propuesta por Holdridge, con el propósito de establecer las unidades de análisis, de forma tal, que cada zona de vida presente en la cuenca sea objeto de inventario, siempre y cuando en ella exista una cobertura vegetal superior al 40 % de su extensión. Luego, para determinar el inventario en las “unidad de análisis” se siguió las recomendaciones metodológicas propuestas por Castañeda, et al (2005), con adaptaciones a los objetivos de la presente investigación, que se resume en los siguientes pasos:

- Instalación de doce parcelas, cuatro por cada cuenca, a razón de una para la cuenca alta, otra para la media y dos para la cuenca baja. De esta forma, fue posible estimar el valor promedio de la biomasa y de la captura de carbono a nivel de cuenca (media, alta o baja).
- Medición biométrica de plantas elegidas al azar. Se determinó el diámetro, altura promedio y densidad para cada categoría (árbol, arbusto y dosel). Esto permitió obtener un total de 75 muestras. Cabe anotar, que la extracción de muestras se realizó para especímenes que alcanzaron la madurez y eso permitió que la biomasa formada fuese la más alta posible.
- Obtención del peso seco a nivel de tallo, ramas y follaje, según corresponda, de cada espécimen y el secado se hizo en un horno eléctrico a 74 °C, hasta alcanzar un peso constante.
- Determinación de la relación peso seco/peso fresco de cada muestra para obtener la materia seca (ms) por componente y con ello se obtuvo el peso seco total aéreo de los especímenes (ramas, tallo, y hojas).

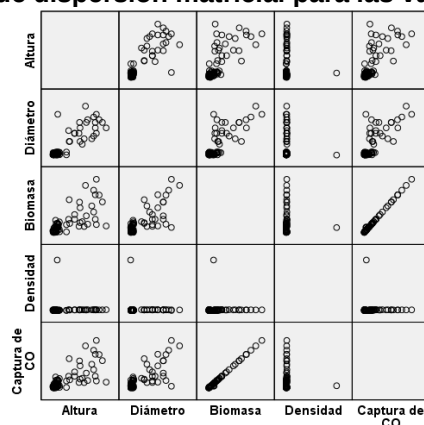
Además se aplicó otros instrumentos de recolección de datos. Uno de ellos fue el mapeo paisajístico, con el uso de imágenes satelitales y paneles de fotografías para delimitar las unidades de paisaje y de esa forma, identificar las zonas donde se instalaron las parcelas. Por último, se empleó guías de observación aplicada a cada una unidades de paisaje para determinar su composición, extensión y biomasa vegetal.

Resultados

Biomasa y biometría vegetal

Diversos valores biométricos vegetales están asociados entre sí y se esperaría que influyesen en la formación de la biomasa, y a través de ella en la captura potencial de carbono. Por ejemplo, se esperaría que parcelas con densidades elevadas presenten altura de planta menores y diámetro más fino. Precisamente, la figura 2 ilustra estas causalidades, aun cuando solo fue posible advertir asociaciones, entre altura de planta, diámetro, biomasa y captura potencial de CO₂. No se aprecian relaciones entre altura y densidad. Una relación muy significativa ocurre entre formación de biomasa y captura de CO₂.

Figura 2. Gráfico de dispersión matricial para las variables estudiadas



Ecuaciones alométricas y captura de carbono

Una técnica para determinar la formación de biomasa y/o productividad primaria neta es el uso de ecuaciones alométricas. De todas ellas, la más frecuente es el modelo biomasa-diámetro (Castañeda, et al, 2005), con la cual se evaluó la regresión lineal multi-variable, cuyo resumen se aprecia en la tabla 1. Sin embargo, es posible que

existan otros modelos que expliquen mejor el comportamiento de las variables altura y densidad.

Tabla 1. Resumen del modelo regresional multivariable o ecuación alométrica 1

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin- Watson
					Cambio R ²	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	0.797 ^a	0.635	0.620	170.65	0.635	41.22	3	71	0.00	1.39

a. Predictores: (Constante), Densidad, altura, diámetro

b. Variable dependiente: Biomasa

El modelo propuesto tiene un coeficiente de determinación medio, con al menos una variable que explica la causalidad entre formación de biomasa y las variables estudiadas. Por tanto, este puede ser válido no solo para explicar la causalidad entre las variables independientes y la variable dependiente, sino para predecir los nuevos valores de la biomasa en función del *pool* de variables estudiadas. El valor (1,395) del estadístico Durbin-Watson indica que los residuos no están correlacionados entre sí.

Tabla 2. Coeficientes de la regresión alométrica 2

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados Beta	t	Sig	95.0% intervalo de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Error estándar				Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1(Constante)	44.54	25.96		1.71	0.09	-7.21	96.30		
Altura	0.24	0.12	0.25	1.89	0.06	-0.01	0.50	0.28	3.50
Diámetro	32.04	7.53	0.57	4.25	0.00	17.01	47.08	0.28	3.51
Densidad	0.79	2.66	0.21	0.29	0.76	-4.52	6.11	0.99	1.00

a. Variable dependiente Biomasa

Los coeficientes y los valores del error y la estadística de colinealidad se presentan en la tabla 2. En el primer caso, se tiene que el β correspondiente al diámetro resulta significativo por su *t-student*, aspecto que difiere sustancialmente de las variables altura y densidad. Además, el diámetro explica en promedio el 57.1% de las varianzas, le sigue en importancia la altura (25.5%). Y respecto al análisis de colinealidad (tabla 3), se tiene que ésta afecta a la altura y al diámetro y no a la densidad. En lo relacionado con el índice de condición, se tiene que la colinealidad es relativa, al tener un valor de 5.061, que es menor al límite de Belsley (20).

Tabla 3. Diagnóstico de colinealidad de la ecuación alométrica 1

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de la varianza			
				(Constante)	Altura	Diámetro	Densidad
1	1	2.45	1.00	0.06	0.03	0.03	0.01
	2	0.99	1.59	0.01	0.00	0.01	0.92
	3	0.45	2.31	0.90	0.03	0.07	0.08
	4	0.09	5.06	0.03	0.94	0.90	0.00

a. Variable dependiente Biomasa

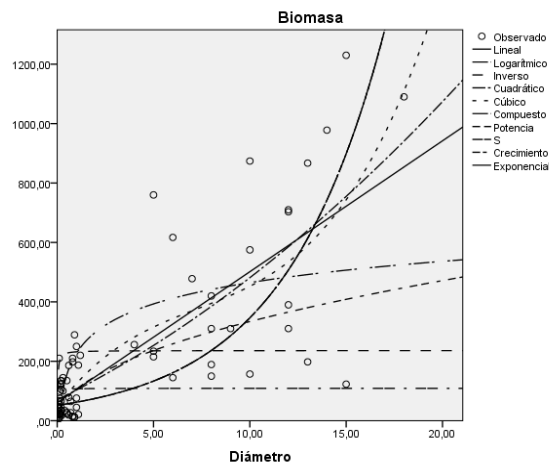
Al comparar la ecuación alométrica clásica con la ecuación propuesta, se tiene que la ecuación biomasa-diámetro es mejor, conforme se aprecia en los resultados de la estimación curvilínea estimada con diferentes ajustes (tabla 4).

Tabla 4. Resumen de diversos modelos de la ecuación alométrica 1

Modelo	R	R ²	Error	F	Sig.
Lineal	0.785	0.616	172.66	117.18	0.000
Logarítmico	0.687	0.472	202.51	65.24	0.000
Inverso	0.180	0.032	274.12	2.45	0.122
Cuadrático	0.788	0.620	172.94	58.78	0.000
Cúbico	0.797	0.635	170.78	41.13	0.000
Compuesto	0.713	0.508	0.93	75.31	0.000
Potencia	0.695	0.483	0.95	68.15	0.000
S	0.152	0.023	1.31	1.71	0.194
Crecimiento	0.713	0.508	0.93	75.31	0.000
Exponencial	0.713	0.508	0.93	75.31	0.000

De los resultados expuestos, se tiene que las expresiones lineales y cubicas son aquellas que presentan los mejores niveles de ajuste, según su coeficiente de determinación que varían de 0.785 y 0.788. Estos niveles de ajuste son mejores que el clásico modelo logarítmico (figura 3).

Figura 3. Gráfico de la ecuación alométrica 1 según diferentes ajustes



De ese modo, se tendrían las siguientes ecuaciones alométricas:

$$B_i = 60.93 + 44.056d \quad (1)$$

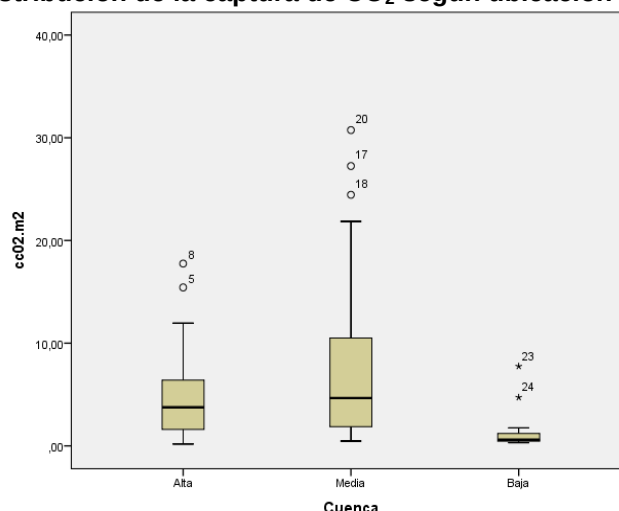
$$B_i = 70.465 + 32.024d + 0.908d^2 \quad (2)$$

$$B_i = 47.347 + 85.568d - 8.296d^2 + 0.379d^3 \quad (3)$$

Captura de carbono en la cuenca

Por lo comentado, en la figura 2, se afirma que hay una relación entre formación de biomasa y captura de carbono; esto permite considerar que tanto las ecuaciones alométricas clásica (diámetro-biomasa) como la propuesta (multi-variable) podrían ser útiles para estimar la captura potencial, teniendo en cuenta el supuesto que como mínimo el 50% del tejido celular contiene carbono (Brown, 1997; Castañeda, et al, 2005; Córdova, Hernande, & Martínez, 2008).

Figura 4. Distribución de la captura de CO₂ según ubicación en la cuenca



En la figura 4 se aprecia la distribución de la captura de carbono según el criterio de ubicación en la cuenca. La mayor dispersión se presenta en la cuenca alta y media, donde se observan composiciones complejas de tres estratos (arbóreo, arbustivo y dosel) con predominio de las dos primeras. Asimismo, en la cuenca baja, se tienen asociaciones básicamente herbáceas y de plantas anuales (cultivos), allí la dispersión en la captura de carbono es menor.

Tabla 5. Resumen del modelo de la ecuación alométrica 2

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio R ²	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	0.792 ^a	0.628	0.612	86.56	0.628	39.93	3	71	0.00	1.39

a. Predictores: (Constante), Densidad, altura, diámetro

b. Variable dependiente: Biomasa

En la tabla 5 se muestra el resumen del modelo de la ecuación alométrica 2 que a diferencia de su homóloga (ecuación 1), tienen como variable dependiente a la captura de CO₂. Este modelo lineal multi-variable tiene un ajuste adecuado (R²=0.792), con un F de Fisher significativo y ausencia de correlación de los residuos. De otro lado, se reproduce la influencia del “diámetro” como principal fuente de explicación de la varianza en la captura de CO₂, la cual además tiene una *t-student* significativa. Por último, el análisis de colinealidad repite lo descrito para la ecuación alométrica 1 (tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes de la regresión alométrica 2

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados Beta	t	Sig	95.0% intervalo de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Error estándar				Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1(Constante)	21.18	13.16		1.60	0.11	-5.07	47.43		
Altura	0.13	0.06	0.28	2.08	0.04	0.00	0.26	0.28	3.50
Diámetro	15.19	3.82	0.53	3.97	0.00	7.56	22.81	0.28	3.51
Densidad	-0.03	1.35	-0.02	-0.25	0.98	-2.73	2.66	0.99	1.00

a. Variable dependiente Biomasa

En cuanto a las expresiones de mejor ajuste para el modelo captura de CO₂-diámetro (tabla 7), se tienen a los modelos lineal, cuadrático y cúbico. Los peores ajustes se

presentan en los modelos, inverso y del tipo “S”. Se puede señalar que el modelo logarítmico es menos recomendable que el lineal y exponencial.

Tabla 7. Resumen de diversos modelos de la ecuación alométrica 2

Modelo	R	R ²	Error	F	Sig.
Lineal	0.778	0.605	87.94	111.85	0.000
Logarítmico	0.688	0.473	101.56	65.60	0.000
Inverso	0.200	0.040	137.50	3.05	0.085
Cuadrático	0.780	0.608	86.23	55.83	0.000
Cúbico	0.790	0.623	87.08	39.18	0.000
Compuesto	0.700	0.490	0.951	70.20	0.000
Potencia	0.701	0.491	0.950	70.33	0.000
S	0.200	0.040	1.305	3.04	0.085
Crecimiento	0.700	0.490	0.951	70.20	0.000
Exponencial	0.700	0.490	0.951	70.20	0.000

Con la ecuación alométrica 2 es posible estimar la captura de carbono por unidad de superficie, en este caso por metro cuadrado. En la expresión (4), CO₂, es la captura potencial por unidad de superficie y *d* el diámetro del espécimen vegetal, dado que el propósito es establecer la captura contenida en la vegetación, que es una variante de la expresión clásica.

$$CO_2 = 29.513 + 21.923d \quad (4)$$

Como era de esperarse, el componente arbóreo contribuye más a la captura de carbono, que los componentes, arbustivo y de dosel. Para simplificar los cálculos posteriores, se obtuvieron dos valores de la captura potencial de CO₂ en t/ha: 0.24 t/ha. (Componente arbóreo) y 0.05 t/ha. (Componente arbustivo y dosel). Por último, en la tabla 8 se presentan los resultados de la estimación de la captura potencia de carbono por componente, con base en el promedio de cuenca. Así, se tiene que la captura potencial en la cuenca del río Lurin es de 32 932.1 tCO₂/año, en la cuenca del río Chancay 14 037.8 tCO₂/año y en la cuenca del río Mala 18 200.8 tCO₂/año, que en su conjunto explicarían una captura de 65 170.8 tCO₂/año y cuyo valor monetario, considerando el precio de 5.48 US por tonelada métrica (Investing, 2016), sería de 357 135.9 US, por año.

Tabla 8. Estimación de la captura potencial de carbono por cuencas y componentes vegetales

Cuenca	Area en ha.				Captura de CO ₂ en tCO ₂ /año					
	Área cultivada	Pastos	Montes /Bosques	Otros	Área cultivada	Pastos	Montes /Bosques	Sub Total (global)	Otros (MDL)	Total (global+MDL)
Lurin	13,783.0	285,467.0	133.0	4,626.0	1,516.1	31,401.3	14.63	32,932.1	508.8	33,440.9
Chancay	26,749.0	100,707.0	161.0	6,129.0	2,942.3	11,077.7	17.71	14,037.8	674.1	14,712.0
Mala	12,826.0	152,559.0	77.0	2,503.0	1,410.8	16,781.4	8.47	18,200.8	275.3	18,476.1
Total	53,358.0	538,733.0	371.0	13,258.0	5,869.3	59,260.6	40.81	65,170.8	1,458.3	66,629.2

A este último valor, se puede añadir la captura potencial vía reforestación arbórea-arbustiva de aproximadamente 13 258 ha., con una captura adicional de 1 458.3 tCO₂/año, con lo cual se tendría 7 991.4 US adicionales.

A modo de conclusión

Los resultados descritos demuestran que la captura de carbono no es una característica privativa de asociaciones forestales, sino que es posible hallar importantes tasas de captura en otros componentes, tales como el herbáceo (dosel) y arbustivo. Eso difiere de las conclusiones que señalan diversos estudios respecto a la captura de CO₂ en el estrato arbóreo (Ordóñez, 1998; Brown & Roussopoulous, 1974; Brown, et al, 1996; Montero, Castillo, & Martínez, 2008). La agricultura es un sector que presenta componentes diversos que capturan carbono de manera compleja (Verhulst, François, & Govaerts, 2015), esto se relaciona con los beneficios que podrían lograrse en la agricultura minifundista con la prestación de servicios ambientales entre ellos la captura de carbono (Ruíz & Soto, 2015).

Una segunda conclusión tiene relación con lo señalado por diversos estudios que relevan la importancia de las asociaciones vegetales secundarias en la captura de carbono, y cuyo ratio promedio sería la mitad de la captura estimada para el componente arbóreo (Díaz, Fachin, Tello, & Arévalo, 2016). Los resultados obtenidos, en este estudio, señalan que aún los sistemas naturales degradados con vegetación secundaria, como es el caso de las zonas estudiadas, podrían brindar niveles de captura de carbono nada marginales. Por ejemplo, la pradera natural tiene un captura que se ubica entre 0.05 t CO₂/ha (estimada en este estudio) a 0.188 t CO₂/ha (Córdova, Hernande, & Martínez, 2008). La menor captura de carbono está relacionada con el nivel de conservación de la pradera natural, la densidad de especímenes y la biomasa formada en condiciones de alta presión ganadera.

La importancia de estudiar la captura de carbono en ecosistemas degradados se inscribe en la estrategia de mitigación de los efectos del cambio climático a que se refiere Biello (2016) y el cual está asociado a los métodos de estimación de la captura de carbono, que como se señaló antes, pueden ser destructivos (Clark, et al., 2001), no destructivos (Wang, et al, 2003) y el uso de ecuaciones alométricas (Rojas, et al, 2015; Basuki, et al, 2009). En este último caso, las ecuaciones alométricas y su uso en la estimación de la captura de carbono tienen dos conclusiones básicas. Una primera, que existen insuficientes casos estudiados en la literatura internacional, respecto a la captura de CO₂ en componentes arbustivo y herbáceo. En total se tendría 44 casos referidos a especies arbustivas, que consideran, en su mayoría, como parámetro central al diámetro (Rojas, et al, 2015). Se aprecia una pequeña lista de captura de CO₂ en asociaciones de tipo dosel y de cultivos (Córdova, Hernande, & Martínez, 2008). Además hay una deuda científica con la investigación del control de la incertidumbre necesario para validar ecuaciones alométricas (Fehrmann & Kleinn, 2006; Návar, 2009; Návar, 2010).

Una última conclusión se refiere a los modelos de índole logarítmica basados en el diámetro de los especímenes, los que son más adecuados para estimar la biomasa del componente arbóreo, pero débiles, por su ajuste, para los componentes arbustivos y herbáceos. De otro lado, nuevas ecuaciones, como las propuestas en este artículo, incluyen otras variables como altura y densidad por unidad de superficie, así como la estructura de asociaciones vegetales, que tienden a estimar, de mejor manera, la biomasa y la función de captura potencial de CO₂ (De Jong, B.; et al, 2009).

Referencias bibliográficas

Arneth, A., Sitch, S., Pongratz, J., Stocker, B. D., Ciais, P. P., & Gasser, T. (2017). Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed. *Nature Geoscience*, 79-84.

- Barton, J. R., & Irarrázaval, F. (2016). Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos naturales: buscando síntesis en la planificación urbana. *Revista de geografía Norte Grande*, 87-110.
- Basuki, T., Van Laake, P., Skidmore, A., & Hussin, Y. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland. *Forest Ecology Management*(257), 1684-1694.
- Bermejo, R., Arto, I., Hoyos, D., & Garmendia, E. (2010). *Menos es más: del desarrollo sostenible al decrecimiento sostenible*. Donostia-San Sebastian: UPV/EHU.
- Biello, D. (2016). La falacia de la captura de carbono: todo plan creíble de mitigación del calentamiento global depende de que la captura de carbono desempeñe un papel importante. *Investigación y ciencia*(474), 64-71.
- Bradley, N. A. (1999). Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. . *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 96:9701-9704.
- Brown, J. K., & Roussopoulos, P. (1974). Estimating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science*(6), 350-356.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical* (Vol. 143). Roma: FAO.
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., & Kauppi, P. (1996). Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. . *Forestry Review*, 75(1), 80-91.
- Carpintero, O. (2007). La apropiación humana de producción primaria neta (AHPPN) como aproximación al metabolismo económico. *ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 25-36.
- Castañeda, A., Vargas, J., Gómez, A., Valdez, J., & Vaquera, H. (2005). Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*, 107-116.
- Ceuleman, R., Janssens, L., & Jach, M. (2001). *Effects of CO2 enrichment on trees and forest: lesson to be learned in view of future ecosystem studies*. México: CICC.
- Clark, D., Brown, S., Kicklighter, D., Chambers, J., Thomlinson, J., Ni, J., & Holland, E. (2001). Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*(11), 371-384.
- Córdova, G., Hernande, H., & Martínez, J. L. (2008). Captura de carbono de un pastizal de la ranchería Emiliano Zapata, Centro, Tabasco. *KUXULKAB´, XIV*(26), 65-70.
- De Jong, B., Rojas-García, F., Olguín, M., & Martínez, P. (2009). *Base de datos con ecuaciones alométricas de árboles y arbustos de bosques y selvas de México*. Villahermosa: El Colegio de la Frontera Sur Unidad.
- Díaz, P., Fachin, G., Tello, C., & Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1(2), 57-67.
- Diédhiou, I., Diallo, D., Mbengue, A., Hernandez, R. R., Bayala, R., Dième, R., & Sène, A. (2017). Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of *Jatropha curcas* L. in Senegal's Peanut Basin. *Global Ecology and Conservation*, 61-69.
- Fehrmann, L., & Kleinn, C. (2006). General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecology and Management*(236), 412-421.
- Feijóo, M. L., Valle, J. B., Tachong, L., & Litardo, E. C. (2016). Economic Valuation of Environmental Services of the Ecological Reserve Mache Chindul, Ecuador Climate Regulation. *Weber Economics & Finance*.
- Fujimori, S., Su, X., Liu, J.-Y., Hasegawa, T., Takahashi, K., Masui, T., & Takimi, M. (2017). Implication of Paris Agreement in the context of long-term climate mitigation goals. *Springer plus*, 1-11.
- García-Torres, S., Kahhat, R., & Santa-Cruz, S. (2016). Methodology to characterize and quantify debris generation in residential buildings after seismic events. *Resources, Conservation and Recycling*, 151.159.
- Garduño, R. (2004). ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez, & A. Fernández, *Cambio Climático: una Visión desde México* (págs. 29-39). México: INESEMARNAT.
- Gore, A. (2010). *Nuestra elección. Un plan para resolver la crisis climática*. Barcelona: OCEANO & gedisa editorial.
- Grace, J. (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* , 189-202.
- Husch, B. (2001). Estimación del contenido de carbono en los bosques. . *Conferencia del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. Valdivia-Chile.

- Investing. (21 de Noviembre de 2016). *Investing.com*. Obtenido de <http://es.investing.com/commodities/carbon-emissions>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: NNUU.
- Ketterings, Q. M., Coe, R., Van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146: 199-209.
- Liu, L. B., Yang, H. M., Xu, Y., Guo, Y. M., & Ni, J. (2016). Forest biomass and net primary productivity in southwestern China: A meta-analysis focusing on environmental driving factors. *Forests*, 7(8), 173., 2-16.
- Lupi, C., Larocque, G. R., DesRochers, A., Labrecque, M., Mosseler, A., Major, J., & Vézina, A. (2017). Biomass from young hardwood stands on marginal lands: Allometric equations and sampling methods. *Biomass and Bioenergy*, 172-181.
- Márquez, L. (2000). *Elementos Técnicos para Inventarios de Carbono*. Guatemala. Guatemala: Fundación Solar.
- Martin, T. (2001). Abiotic vs. Biotic influences on habitat selection of coexisting species: climates change impacts?. *Ecology*, 82:175-188.
- Masera, O. R., Ordóñez, M., & Dirzo, R. (1997). Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35: 265- 295.
- McCarthy, J. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation biology*, 320-331.
- Mekonnen, Z. A., Grant, R. F., & Schwalm, C. (2016). Contrasting changes in gross primary productivity of different regions of North America as affected by warming in recent decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 50-64.
- Montero, N., Castillo, O., & Martínez, J. L. (2008). Captura de carbono en un remanente de selva alta perennifolia en el Ejidos Niños Héroes, Tenosique, Tabasco. *KUHULCAB*, XIV(26), 45-48.
- Moss, R., Oswald, J., & Baines, D. (2001). Climate change and breeding success: decline of the capercaillie in Scotland. *J. Anim. Ecol. Ecology*, 70:47-61.
- Nath, S., Nath, A. J., Sileshi, G. W., & Das, A. K. (2017). Biomass stocks and carbon storage in *Barringtonia acutangula* floodplain forests in North East India. *Biomass and Bioenergy*, 37-42.
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*(257), 427-434.
- Návar, J. (2010). Measurement and assessment methods of forest above ground biomass: a literature review and the challenges ahead. En M. Momba, & F. Bux, *Biomass*. Croatia: Sciyo.
- Nebel, B. J., & Wrigth, R. (1996). *Environmental Science*. New York: Prentice Hall.
- Ordóñez, A. (1998). *Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán*. San Juan: Facultad de Ciencias. UNAM.
- Ordóñez, A. (1998). *Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán*. *Tesis de Licenciatura*. San Juan, Michoacan, México: Facultad de Ciencias. UNAM.
- Ordóñez, J., Rivera, R., Tapia, M. E., & Ahedo, L. R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7-16.
- Pagiola, S., Landell-Mills, N., & Bishop, J. (2003). *La Venta de Servicios Ambientales Forestales: Mecanismos Basados en el Mercado para la Conservación y el Desarrollo*. México: INESEMARNAT.
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4): 573-593.
- Peralta, C. M. (2016). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina Urban response to climate change in Latin-American. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 351-357.
- Restrepo-Coupe, N., Levine, N. M., Christoffersen, B. O., Albert, L. P., Wu, J., Costa, M. H., & Malhi, Y. S. (2017). Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison. *Global change biology*, 181-208.

- Rojas, F., De Jong, B., Martínez, P., & Paz, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* (2015)(72), 835-864.
- Rojas, F., De Jong, B., Martínez, P., & Paz, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* (2015)(72), 835-864.
- Ruíz, C., & Soto, L. (2015). Agroforestería social para la captura de carbono en Chiapas: más allá del incentivo económico. *Revista de ciencias sociales interdisciplinarias*, 4(2), 249-265.
- Sands, R. D., & Suttles, S. A. (2017). Climate Economics, Bioenergy, and Land Use in a General Equilibrium Framework. En R. D. Sands, & S. A. Suttles, *World scientific reference on natural resources and environmental policy in the era of global change* (Vol. 3, págs. 303-331). Computable General Equilibrium Models.
- Schimel, D., Enting, G., Heiman, M., Wigley, T. ..., Rayneud, D., Alves, D., & Seigenthaler, U. (1995). CO₂ and the carbon cycle. En J. Houghton, L. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. Callander, E. Haites, & N. Harris, *Climate change 1994 radiative forcing of climate change and an evaluation of IPCC IS92 emission scenarios* (págs. 37-71). Cambridge: Cambridge Press University.
- Schneider, T., Teixeira, J., Bretherton, C. S., Brient, F., Pressel, K. G., Schär, C., & Siebesma, A. P. (2017). Climate goals and computing the future of clouds. *Nature Climate Change*, 7(1), 3-5, 3-5.
- Stout, B., Lal, R., & Monger, C. (2016). Carbon capture and sequestration: The roles of agriculture and soils. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1-8.
- Sung, S., Forsell, N., Kindermann, G., & Lee, D. K. (2016). Estimating Net Primary Productivity under Climate Change by Application of Global Forest Model (G4M). *Journal of the Korean Society People, Plants, and Environment*, 549-558.
- Vanuytrecht, E., & Thorburn, P. J. (2017). Responses to atmospheric CO₂ concentrations in crop simulation models: a review of current simple and semicomplex representations and options for model development. *Global Change Biology*.
- Vázquez-Rowe, I., Cáceres, A. L., Torres-García, J. R., Quispe, I., & Kahhat, R. (2016). Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *Journal of Cleaner Production*, 4369-4383.
- Verhulst, N., François, I., & Govaerts, G. (2015). *Agricultura de conservación y captura en el suelo. Entre el mito y la realidad del agricultor*. México: CIMMYT.
- Verwijst, T., & Telenius, B. (1999). Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management*, 121: 137-146.
- Walsh, B., Ciais, P., Janssens, I. A., Penuelas, J., Riahi, K., Rydzak, F., & Obersteiner, M. (2017). Pathways for balancing CO₂ emissions and sinks. *Nature Communications*.
- Wang, H., Hall, C., Scatena, F., Fetcher, N., & Wu, W. (2003). Modeling the spatial and temporal variability in climate and primary productivity across the Luquillo mountains. *Forest Ecology and Management*(179), 69-94.
- Waring, B. G., & Powers, J. S. (2017). Overlooking what is underground: Root: shoot ratios and coarse root allometric equations for tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 10-15.
- Zanetti, E. A., Gómez García, J. J., Mostacedo, J., & Reyes, O. (2017). *Cambio climático y políticas públicas forestales en América Latina: una visión preliminar*. Santiago de Chile: CEPAL.