

Modelo de captura y almacén de carbono en la Cuenca Guayalejo–Tamesí (Tamaulipas, México).

Glenda N. Requena Lara. Universidad Autónoma de Tamaulipas/Universidad de Sevilla. Ciudad Victoria, México. grequena@uat.edu.mx

Silvia L. Casas González. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Ciudad Victoria, México. scasas@uat.edu.mx; silvia.casas757@gmail.com

Rafael Cámara Artigas. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. rcamara@us.es

Jorge Brenner Guillermo. Corpus Christi, USA. The Nature Conservancy. jbrenner@tnc.org

Juan F. Morales Pacheco. Universidad de Sevilla. Cd. Victoria, México.

Juanmorales53@gmail.com.

RESUMEN

Los ecosistemas retiran y almacenan bióxido de carbono atmosférico, contribuyendo a mitigar el efecto invernadero en el planeta; disturbios como la deforestación y la quema de la cobertura vegetal liberan este y otros gases a la atmósfera, por lo que la forma en que se usen y manejen las coberturas boscosas puede ayudar o perjudicar a las acciones de mitigación del efecto invernadero. En el presente trabajo se identificaron los sitios con mayor capacidad de captura y almacén de carbono en la Cuenca Guayalejo-Tamesí (ubicada en el noreste de México), a partir del uso de imágenes de satélite para definir la cobertura vegetal y los usos actuales del terreno (LULC). El mapa así generado se procesó a través del *software* InVEST 1.005 para ArcGis, que produce una cuantificación del carbono almacenado, basándose en datos (obtenidos de la literatura) de los cuatro sumideros principales: suelo, biomasa aérea, biomasa del subsuelo y materia orgánica en descomposición. Con esta base, se realizó una estimación de la captura anual por cada LUCL.

El almacén de carbono en la Cuenca ascendió a 186.7 millones de toneladas en octubre de 2011, destacando por su aportación el grupo de las selvas húmedas y subhúmedas, que constituyen el 36% del almacén. Por otra parte, se obtuvo que los ecosistemas de la Cuenca secuestraron una cantidad bruta (antes de balance) de 4.5 millones de MgC en el año 2011, quedando fuera del alcance de esta investigación la captura neta.

El conocimiento de la distribución espacial de este SSAA pone a disposición de los tomadores de decisiones una perspectiva más adecuada que la usada actualmente para dirigir las estrategias de conservación y manejo de los bosques en la Cuenca, particularmente las enfocadas a los pagos por este servicio.

INTRODUCCIÓN

De los diferentes Gases de Efecto Invernadero (GEI), es el bióxido de carbono (CO₂) que actualmente cuenta con un pago económico por tonelada retenida en los ecosistemas; esto ha generado un mercado internacional de ventas de créditos, como una estrategia del Protocolo de Kyoto para disminuir la contaminación por dicho gas. En México, país miembro de la Convención Marco de Cambio Climático, este pago se realiza principalmente a propietarios comunales (conocidos como “ejidos”), que son seleccionados después de inscribirse de forma voluntaria al programa Proárbol de la CONAFOR.

Actualmente, México es el primer país en vías de desarrollo que cuenta con una legislación específica acerca del cambio climático (Herrera, 2012, en prensa: <http://www.presidencia.gob.mx/2012/07/mexico-ejemplo-de-sustentabilidad-a-nivel-mundial/>), la Ley General de Cambio Climático (LGCC), decretada en el DOF el 6 de junio de 2012 (SEMARNAT, 2012). Dentro de sus objetivos con respecto la captura y fijación de carbono, se encuentra el de “regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático” (Art. 2, Frac III). En cuanto a la mitigación del cambio,

menciona como acciones la reducción de emisiones y captura de CO₂ el “mantener e incrementar los sumideros de carbono”, incrementar “más ecosistemas a esquemas de conservación”, así como “Diseñar y establecer incentivos económicos para la absorción y conservación de carbono en las áreas naturales protegidas y las zonas de conservación ecológica” (Art. 34 Frac III a, e y h).

Por su parte, dentro de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (a la que se refiere la LGCC en sus Artículos 60 al 64), contempla acciones respecto a la vegetación y el uso del suelo, que además de enfocarse a la reducción de emisiones, también tratan de la “conservación de carbono, captura de carbono y sustitución de carbono”; con las actividades de este rubro se pretende almacenar 12,800 a 23,350 millones de toneladas de CO₂ equivalente para 2012 (CICC, 2007).

En mayo de 2010, México firmó con Noruega un Memorándum de Entendimiento sobre cooperación en ambiente, bosques y cambio climático, que permitan diseñar e implementar políticas y estrategias para la reducción de emisiones GEI, manejo sostenible de los bosques y su mejora como almacenes de carbono. Contempla varias actividades, destacando la de modelación de carbono, tanto por monitoreo en campo como el desarrollo de modelos de contabilidad basados en diferentes inventarios forestales, lo que significa un aumento en la efectividad para obtener simulaciones de los escenarios generados a través del implemento de políticas y estrategias (<http://www.mrv.mx>).

Siguiendo esta idea, el objetivo de este trabajo fue analizar cómo las diferentes coberturas de vegetación y uso del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) actúan como almacenes y sumideros de carbono dentro de la cuenca Guayalejo-Tamesí, en el estado de Tamaulipas (México).

ÁREA DE ESTUDIO

Tamaulipas se ubica en el noreste del territorio mexicano, limitando al norte con Texas (en Estados Unidos) y al oriente con el Golfo de México (Figura1). Cuenta con una superficie de 79,337 kilómetros cuadrados y una población de 3'268,554 personas (INEGI, 2010). Al sur del estado, la cuenca Guayalejo-Tamesí ocupa casi 15,000 Km² (1'497,340 Ha) y tiene una población de 810,059 personas, que se dedican de forma extensiva al cultivo de caña de azúcar, granos y hortalizas, así como a las actividades agroindustriales, maquiladoras diversas e industria química y petroquímica.

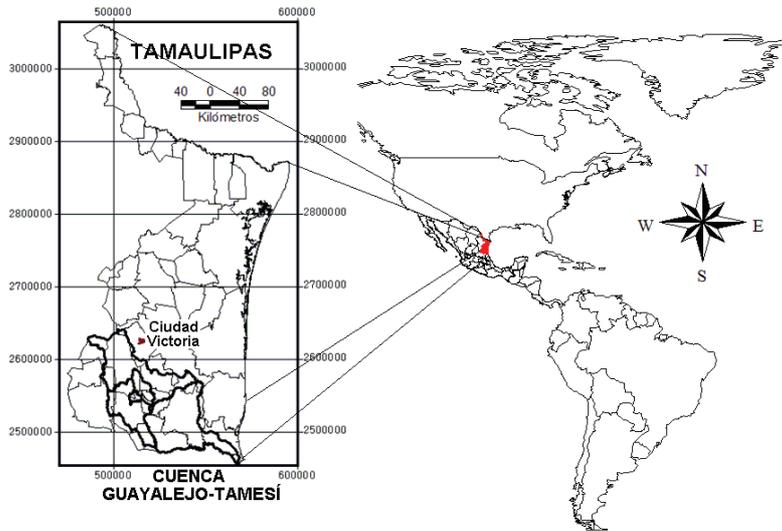


Figura1.-: Área de Estudio

El área de estudio se sitúa sobre el Trópico de Cáncer, lo que, aunado a su cercanía al Golfo de México y al acentuado gradiente de altitud de la Sierra Madre Oriental, le permiten una alta diversidad de ecosistemas, ubicándose en el límite de dos regiones faunísticas (Figura 2). En gran parte de la cuenca, el clima tiende a ser cálido y húmedo, debido a que se encuentra en su mayoría al sur del trópico de Cáncer; no obstante, en las áreas montañosas de la Sierra Madre, se presentan climas templados y semifríos propios de las altitudes mayores a 3,000msnm; además, el efecto de pantalla que causa las primeras estribaciones de la mencionada Sierra, hace que en el altiplano el clima sea de características semidesérticos, con subtipos secos y semi-secos. De esta forma, el rango de precipitaciones promedio va desde 200 mm hasta 1800 mm al año.

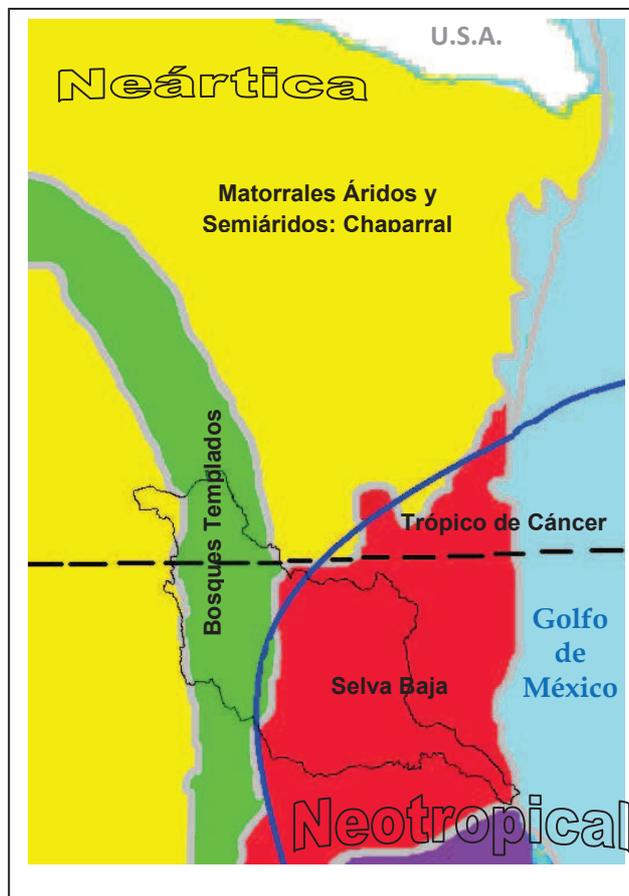


Figura 2. Regiones faunísticas y ecosistemas en Tamaulipas y en la cuenca Guayalejo-Tamesí (límite en línea negra continua). El límite entre regiones se muestra en azul (Fuente: INEGI, 2005)

Las características geográficas le permiten el desarrollo de una gran variedad de ambientes y comunidades vegetales de forma que dentro de su territorio ocurre el encuentro de los reinos Holártico y Neotropical, con tres regiones y cuatro provincias florísticas, según Rzedowski (1978, citado por UAT, 2001); la gran variedad de ecosistemas que concurren dentro de una distancia longitudinal de 200 Km incluye manglares costeros, selvas húmedas y subhúmedas, comunidades montañosas de bosques de niebla y pino-encino, así como matorrales desérticos.

No obstante esta gran biodiversidad, los usos de suelo han sido extensos, por lo que la cuenca prácticamente se divide en dos en cuanto a su cobertura de vegetación y uso antrópico: los terrenos aprovechables económicamente (llanuras, valles y bajadas de poca pendiente) ocupan casi 50% de la cuenca. Así, la mayor parte de la cobertura se clasifica como agricultura y pastizales cultivados e inducidos.

METODOLOGÍA

De acuerdo con Talliset *al.* (2008), el conocimiento de los sitios con mayor capacidad de captura y almacén de carbono, con objetivos de manejo y conservación puede ser representado con mayor eficiencia en forma de mapas. Por lo tanto, el modelo biofísico de este SSA fue generado utilizando el módulo InVEST 1.005 (de XX) para ArcGis 9.2. Se basa en el cálculo del almacenamiento de carbono por unidad de superficie en el terreno (hectáreas); tanto el almacén como la captura dependen en gran parte de cuatro depósitos ("sumideros" o "pools") que cada ecosistema posee: biomasa aérea (tallos, hojas, ramas, etc.), biomasa subterránea (los sistemas radiculares vivos), suelo y materia orgánica en descomposición (hojarasca y madera muerta). El modelador está habilitado para incluir un quinto depósito, referente a la madera de cultivos y que es convertida en productos de vida media o larga (muebles, casas, etc.). Este último no fue considerado en el presente trabajo porque, aunque existen algunas pequeñas plantaciones, las instituciones oficiales no especifican la producción proveniente de cultivo.

Es importante aclarar que sólo se evaluó el servicio de almacenamiento de carbono mediante el modelador, debido a que la captura implica un incremento del carbono almacenado a través del tiempo (Talliset *al.*, 2010); esto significa la necesidad de evaluar una mapa futuro del LULC, cuya proyección del actual rebasa los alcances del presente trabajo.

Construcción del modelo biofísico de Almacén de carbono.

Se investigaron los promedios de carbono fijado por cada depósito de cada clase del LULC en las referencias bibliográficas, buscando aquellas que refirieran estudios de ecosistemas tamaulipecos o similares en otras partes de México o del mundo. Se hicieron también las siguientes consideraciones generales:

- Todas las cantidades se homogenizaron a carbono equivalente, multiplicando por un factor de 0.2727 cuando se reportaban toneladas de CO₂.
- Cuando sólo se encontraron valores de biomasa, se multiplicó por un factor de 0.5 para obtener el carbono fijado, según sugieren Brown y Lugo (1984, en Pal *et al.*, 1999).

Consideraciones particulares, para los casos donde no se encontraron valores específicos para el LULC o alguno de sus depósitos:

- Los valores para algunos LULC están dados por estudios hechos para especies indicadoras, como el caso de *Typhadominguensis* para Tular (Ohsowski, 2008; Plascencia y Kvet, 1993; Rocha y Goulden, 2009; Marín, *et al.* 2011); *Prosopisjulifloray Cerdiciumfloridurn* para Mezquital (Barth y Klednneson, 1982); *Ludwigiaoctovalvis*, *Echinochloapolystachya*, *Cyperusesculentus* y *Polygonumspectabile* para biomasa aérea de zonas inundables (Rodríguez y Henry, 2010).
- En los cuerpos de agua, se incluyeron para a) biomasa “aérea” los valores de *Myriophyllumaquaticum* y *Eichhorniaazurea* (Rodríguez y Henry, 2010) sumados al fitoplancton de agua dulce (Metanczuk, 2008).
- Para la materia orgánica en descomposición de: a) la selva baja espinosa, se tomó el valor de la hojarasca del matorral espinoso tamaulipeco reportado por Návar y Jurado (2009); b) en las zonas quemadas, se dio el valor de las cenizas para cultivo de caña de azúcar estimado por Pulido (1987, en Hernández *et al.*, 1995).
- En caso de la clase “suelo desnudo”, se le otorgó el valor estimado para el suelo urbano (Roshetkoet *al.*, 1995), mientras que el resto de los depósitos se le valoró con cero.
- Los depósitos de las áreas urbanas fueron valorados con las referencias de Roshetkoet *al.* (1995) para suelo y jardines urbanos, que contemplan condiciones más húmedas que las del sur de Tamaulipas (donde se ubican las mayores manchas urbanas de la cuenca) y que permiten un arbolado y ajardinado abundante dentro de la ciudad: 100 m.s.n.m., temperaturas promedio de 28°C y lluvias abundantes (5-6 meses con más de 2000 mm de precipitación)

Otras consideraciones:

- Para la agricultura en sistema temporal de ciclo anual, se tomaron los valores referidos por Etcheverset *al.* (1995) para los sistemas equivalentes (en labranza tradicional) de la región Mixe de Oaxaca, donde la vegetación natural está representada por bosques secundarios.
- En la agricultura de riego, se utilizó la caña de azúcar como indicador, y en particular en cuanto al suelo, la estimación de Vianeí (2009) para cultivos de caña con quema de seis años y la medición a 30 cm de la superficie.
- En la agricultura con cultivos permanentes, se utilizaron los valores que reporta Carvajal (2009) para cítricos, pues es el tipo que más se cultiva en la cuenca.

A partir de este segmento, se utilizarán las siglas siguientes para la vegetación y el uso del suelo: AGR= agricultura de riego; AGTA= agricultura de temporal, cultivos anuales; AGTP = agricultura de temporal, cultivos permanentes y semipermanentes; AGUA= cuerpo de agua; BE= bosque de encino; BMM= bosque húmedo (mesófilo) de montaña; BP= bosque de pino; BPE= bosque de pino/encino; BT= bosque de táscate; DESN= suelo desnudo; INU= zona inundable; MAN= Manglar; MDR= matorral desértico rosetófilo; MSM= matorral submontano; MZQ1= mezquital; PALM= palmar; PZC= pastizal cultivado; PZI (pzi)= pastizal inducido; SAMS= selva alta y mediana subperennifolia; SBC= Selva baja caducifolia y subcaducifolia; SBEhzch= selva baja espinosa (incluye huizachal); SMSC= selva mediana caducifolia y subcaducifolia; TUL= popal-tular; URB= áreas urbanas; vs= vegetación secundaria

A continuación, se muestran los valores encontrados para los diferentes depósitos de carbono (Cuadro 1). Estos fueron ingresados al modelador del InVEST 1.005 para evaluar el mapa de LULC.

Cuadro1. Carbono promedio anual (en Mg) almacenado por hectárea en cada depósito del LULC.

LULC	C _{aj}	Referencia	C _{bj}	Referencia	C _{sj}	Referencia	C _{oj}	Referencia
PZI	10.10		2.50		113.10		1.60	
BPE	83.31		16.50		36.00		0.31	
BMM	56.70		3.32		152.00		5.89	
BEBPEvs	83.31		16.50		36.00		0.31	
AGTA	4.82		2.89		298.00		0.00	
AGTApzi	2.45		1.49		120.70		13.10	
MSM	5.18		0.27		16.36		1.40	
BE	29.80		14.20		45.00		7.62	
MDR	5.18		0.27		16.36		1.40	
BP	118.00		19.00		120.00		5.03	
QUE	0.05		1.70		20.10		0.15	
MZQ1	45.11		5.00		56.36		6.58	
MZQvs	35.57		5.00		20.00		6.58	
DESN	0.00		0.00		60.80		0.00	
URBA	35.60		8.80		60.80		2.00	
BT	118.00		19.00		120.00		5.03	
SBC	69.40		13.70		83.70		11.50	
SMSC	153.00		13.00		113.00		28.00	
AGR	27.38		1.13		27.13		0.61	
AGUA	8.56		0.39		180.00		16.60	
SAMS	50.72		1.09		31.36		195.00	
SBCvs	137.00		10.00		354.00		0.70	
PZC	19.20		7.50		113.10		1.60	
SBEhzch	14.73		0.00		27.27		4.34	
AGTP	41.80		13.60		108.90		1.13	
PALM	59.85		1.12		21.00		0.30	
RIPA	11.84		4.60		12.47		2.28	
INU	7.45		14.00		180.00		16.60	
TUL	4.39		36.79		288.00		17.30	
MAN	156.40		127.00		164.40		57.60	

NOTAS: Carbono en Biomasa: aérea, C_{aj}; del subsuelo, C_{bj}; Suelo, C_{sj}; materia orgánica en descomposición, C_{oj}.

C_{aj}, C_{bj}, C_{sj}, C_{oj} son las toneladas métricas de carbono almacenado (en Mg de Ca ha⁻¹) en los depósitos del LULC_j, donde j=1,2...J son los LULC presentes en el área de estudio. El modelador entonces realiza la suma algebraica de cada uno de los depósitos para cada celda del *grid* que representa un LULC de la cuenca, devolviendo así el carbono total almacenado (C_t):

$$C_t = \sum C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj}$$

Cálculo del secuestro de carbono

Al no contar con un mapa antiguo de LULC para estimar el secuestro de carbono en la Cuenca a partir del modelador, se buscaron en la literatura los valores de fijación para ecosistemas con la mayor edad reportada en la fuente, y que pudieran equivaler a los de

la cuenca, como se muestra en el Cuadro 2. Estos valores se multiplicaron por la superficie de cada LULC.

Cuadro2. Secuestro anual de carbono en ecosistemas equivalentes a los LULC de la cuenca.

Ecosistema descrito	LULC	MgC/año	Fuentes
Vegetación de ladera secundaria y alterada	PZI	2.50	Etcheverset <i>al.</i> (1995)
Bosques tropicales	SBC, SMSC	5.50	Szott-94; Hougt95 en Etchevers
Acahuales	BMM	5.00	Etcheverset <i>al.</i> (1995)
Bosque tropical secundario con altas tasas de uso	AGTApzi	1.65	Uhlet <i>al.</i> (1988) en Kauffmanet <i>al.</i> 2009
Pastura con árboles dispersos	PZC	3.90	Massa (2009)
Cultivo de caña de azúcar	AGR	4.20	Massa (2009)
Paisaje mínimo urbano	URB	0.03	Zirkle <i>et al.</i> EN Lal y Agustin (2012)
SBC después de quemarse, a largo y corto plazo	QUE, SBCvs	2.50	Vargas <i>et al.</i> , 2008
Cultivo de naranja	AGTP	5.60	Carvajal, 2009
Agricultura de barbecho	AGTA	1.00	Návar, 2008
Bosque tropical deciduo	SBC	3.90	Martínez-Yrizar, 1992 En Clark, <i>et al.</i> , 2001
Bosque de mezquite	MZQ	1.94	Scott, <i>et al.</i> 2006
Matorrales	MDM, MDR	0.80	Emmerich, 2002
Bosque de matorral espinoso tamaulipeco	MET, MSM	1.08	Návar-Chaidez, 2008
Bosque de encino no degradado	BE	5.86	Jina, <i>et al.</i> , 2008
Bosque de pino no degradado	BP	5.86	Jina, <i>et al.</i> , 2008
Bosque de encino degradado	BEBPEvs	1.66	Jina, <i>et al.</i> , 2008
Bosque de pino degradado	BEBPEvs	1.17	Jina, <i>et al.</i> , 2008
Bosque tropical lluvioso	SAMS	5.90	calculado a partir deMahli, <i>et al.</i> , 2002
Planicie inundable	INU, AGUA	1.80	Zehetner, <i>et al.</i> , 2009
Plantío de palma de aceite	PALM	7.99	Foong, <i>et al.</i> , 2009
Dunas: se asume que no existe secuestro en este ecosistema	DESN	0.00	Xie y Leschen, 2012
Biomasa aérea de <i>Juniperus occidentalis</i> (1); bosque de coníferas del centro de Durango (2)	BT	1.55	(1) Gholz, 1980; (2) Aguirre-Bravo, 1987 EN Návar y Rodríguez, 2005
Manglar	MAN	1.80	Duarte, <i>et al.</i> , 2005 EN Xie-y-Leschen, 2013; Nellemann, <i>et al.</i> , 2009 EN Bezaury, 2010
<i>Typhasp. (cattailmarsh)</i>	TUL	2.64	Bernal y Misthc, 2012
Ecosistema ripario	RIPA	1.50	Bernal y Misthc, 2012; McCarty y Ritchie (2002) EN Kayranli, <i>et al.</i> , 2010

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Aunque existen estimaciones de captura y almacén de carbono de ecosistemas mexicanos, en Tamaulipas son escasos (Rodríguez Laguna *et al.*, 2008). Por ello, se generó una base de datos para este trabajo como sistema de referencia para integrar y transferir los valores específicos de carbono almacenado en los cuatro sumideros de cada

uno de los ecosistemas de la cuenca. En total, 98 referencias acerca de contenidos de carbono en diferentes ecosistemas estuvieron disponibles para esta investigación; 47 de éstas fueron usadas para ingresar los valores al modelo (ANEXO XX). Los estudios realizados en México a este respecto fueron 21, y en la cuenca se limitan a los llevados a cabo por Manzano *et al.* (2009) para mezquital en el Noreste de México y los de Rodríguez Laguna *et al.* en la Reserva El Cielo para: BMM (2006), SBC (2008) y BEP (2009).

De acuerdo con De Alba y Reyes (1998), las estimaciones de carbono almacenado en los ecosistemas dependen de su tipo, edad, densidad, y si se incluyen factores de dinámica en el uso del suelo, se obtienen valores de captura (con valor ambiental positivo, como el almacén) y liberación (con valor negativo, al contribuir con el calentamiento de la atmósfera). El modelo biofísico de este SSAA expresa el carbono almacenado por hectárea en los LULC de la cuenca, de acuerdo con las estimaciones para cada uno de los sumideros evaluados, y que se reportan en la literatura: biomasa aérea, biomasa del subsuelo, Materia Orgánica en Descomposición (MOD) y carbono del suelo.

Los suelos de representan el sumidero de mayor importancia en la cuenca, contribuyendo 111.31 M MgC, lo que significa poco más del 59.6% del total. Los ecosistemas acuáticos son los de mayor contenido de carbono en el suelo por hectárea, ya que son ricos en materia orgánica (Martínez y Masera, 2003). No obstante, dichos ecosistemas tienen escasa cobertura superficial, por lo que no son grandes contribuyentes este sumidero en general; esto con excepción de los cuerpos de agua, pues su superficie es lo suficientemente extensa como para contribuir con 5.54 millones de toneladas, ocupando el séptimo sitio en aportación, después de las selvas caducifolias y subcaducifolias y de los terrenos ya sea con actividad agrícola de temporal o pecuaria.

Los ecosistemas con dominancia de estructura arbórea obtuvieron los más altos valores de biomasa aérea por hectárea. Esto, aunado a su significativa cobertura superficial hace que, en conjunto, las selvas subhúmedas (SMSC, SBC y SBCvs) aporten más de la mitad (52.4%) del carbono almacenado en este sumidero de la cuenca, que se estimó en 64'664,278.28 Mg C. Este es el segundo de importancia, que con 57.22 M MgC provee 30.6% del almacén total.

Los depósitos conformados por la biomasa del subsuelo y la MOD representan respectivamente 5 y 4% del almacén total de carbono en la cuenca. El primero, con 9.832 millones de toneladas y el segundo con 8.603. Por su estructura arbórea, el manglar es el ecosistema que presenta más carbono almacenado por hectárea en cuanto a biomasa del subsuelo, pero por aportación como LULC son las selvas subhúmedas y los bosques de encino los que contribuyen con más de un millón de toneladas cada uno a este depósito. En cuanto al carbono almacenado en la MOD, destacan las comunidades acuáticas y subacuáticas por su alto contenido por hectárea (con el manglar también en el primer lugar), pero como LULC, sólo las selvas subhúmedas y la agricultura de temporal en fase de abandono supera el millón de toneladas, sobresaliendo la SMSC con 2.23 millones de toneladas de carbono depositadas en la MOD.

El contenido total de carbono almacenado estimado en el área de estudio es de 186.72 millones de toneladas (186'717,312.14MgC), para octubre de 2011, con un promedio de 124.7 Ton/Ha. La Figura 3 representa la distribución espacial de este SSAA prestado por los ecosistemas de la cuenca. Destaca una mayor concentración tanto en las porciones

de menor altitud de las áreas montañosas, donde se ubican las regiones selváticas; como en las zonas de vegetación secundaria asociada con ecosistemas acuáticos.

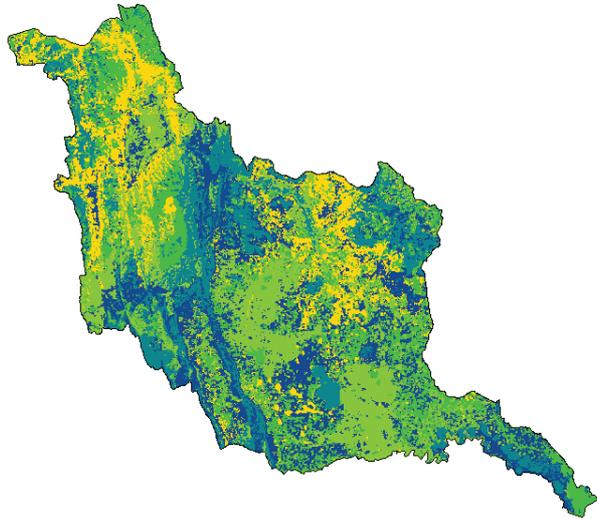


Figura 3.- Modelo de la distribución espacial del carbono almacenado en el área de estudio, para octubre de 2011.

Correspondiendo con la distribución espacial ya mencionada, destaca por su aportación al almacén de carbono en la cuenca el grupo de las selvas húmedas- subhúmedas y los palmares (SBC, SBCvs, SMSC, SAMS y PALM), seguido del sistema agropecuario y de los bosques (Figura 4). Los ecosistemas con menores densidades vegetales, como los cuerpos de agua y los asociados a condiciones menos húmedas obtuvieron los valores más bajos dentro de las comunidades nativas. Como era de esperarse, el grupo de los sistemas perturbados y las manchas urbanas son los de menor contribución al almacén de carbono en la cuenca.

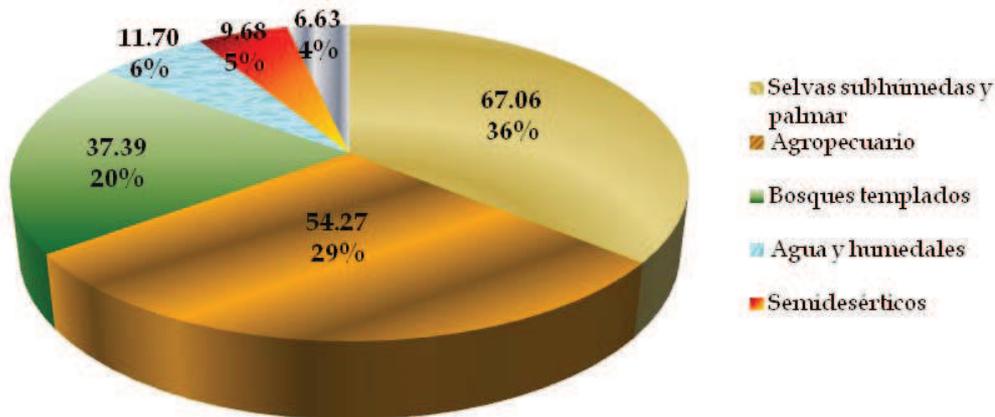


Figura 4. Aportación al almacén de carbono en la cuenca, de los grupos principales. En millones de Mg para el año 2011.

En cuanto a los contenidos por LULC, el Cuadro 3 muestra las cantidades de carbono almacenadas por hectárea y por superficie total de cada uno. En primera instancia, y aunque con escasa contribución al almacén de carbono en la cuenca (por ser el de menor superficie), el ecosistema con mayor capacidad por hectárea es **el manglar**, con más de 505 MgC. Donato *et al.* (2011) coinciden con este resultado al afirmar que se encuentra entre los bosques tropicales con mayor riqueza en contenido de carbono; Kayranliet *al.*

(2010) van más allá, afirmando que los humedales en general, son los ecosistemas terrestres con más alta densidad de dicho elemento. En el Indo-Pacífico, alcanzan hasta 1,203 MgC/Ha (Donato *et al.*, 2011), aunque Jerath (2012) estimó un contenido mucho mayor en los manglares de Florida, de 7,144. Gran parte de estos contenidos (49 al 98%) se encuentran formando parte de sus suelos ricos en materia orgánica; por esta razón, al enfrentarse al los cambios de uso de suelo, estiman que se liberan emisiones equivalentes al 10% de la deforestación global anual, a pesar de tratarse de un área de apenas 0.7% del total deforestado (Donato *et al.*, 2011).

Cuadro 3. Carbono almacenado en los LULC de la cuenca, ordenados de mayor a menor según su contenido por hectárea.

LULC	Mg C/Ha	Mg C/ LULC	LULC	Mg C/Ha	Mg C/ LULC	LULC	Mg C/Ha	Mg C/ LULC
MAN	505.40	129,528	AGTP	165.43	1'433,259	PALM	82.27	623,538
SAMS	414.00	13'300,992	PZC	141.40	9'032,380	SBCvs	80.70	8'044,983
TUL	346.48	5'067,015	AGTApzi	137.74	18'584,808	MZQvs	67.15	2'828,760
SMSC	307.00	24'421,850	BEBPEvs	136.12	4'408,020	DESN	60.80	2'301,480
BP	262.03	7'908,208	BPE	136.12	9'707,040	AGR	56.25	9'313,590
BT	262.03	936,912	PZI	127.30	1'369,620	SBEhzch	46.34	2'724,615
INU	218.05	138,663	AGTA	116.61	15'462,603	RIPA	31.19	9,396
BMM	217.91	6'233,112	MZQ1	113.05	863,296	MDR	23.21	1'211,584
AGUA	205.55	6'280,140	URBA	107.20	2'163,630	MSM	23.21	1'746,294
SBC	178.30	20'395,760	BE	96.62	7'885,380	QUE	22.00	670,572

Otros humedales de la cuenca presentan sistemas parecidos al manglar, con suelos que suelen ser ricos en materia orgánica, como afirman Martínez y Masera (2003) quienes encontraron una mayor cantidad de carbono en el suelo de pastos de sitios inundables (que en este trabajo incluye a los tulares dominados por *Typhaspp.*) que en otras partes de la biomasa, debido a la rapidez con que la materia orgánica se descompone en condiciones de alta humedad. Por ello, los otros humedales de la cuenca obtuvieron altos valores de carbono por hectárea: **el tular y las zonas inundables**, con 346.5 y 318 Mg C/Ha, y que en conjunto aportan 5'205,678 Mg C al almacén del área de estudio. Los tulares más importantes por su superficie en la cuenca se encuentran asociados y contiguos a la vegetación de manglar, formando parte del sistema lagunar del Tamesí; se ubican entre los ecosistemas con mayor productividad primaria neta en el mundo (clasificados como "pantanos"), debido a una alta eficiencia en el uso del carbono, más que en su alta tasa de fijación reflejada en su acelerado crecimiento fotosintético (Rocha y Goulden, 2008 24typha). No obstante, estos almacenes son altamente propensos a actuar como emisores de GEI, según señala Hernández (2010 27c-suelo); tal autor elaboró un balance en los humedales como sumidero de carbono y fuente de metano, encontrando que el sumidero es muy alto debido a la formación de turba, pero con la sequía o drenaje, el carbono fijado se oxida, liberándose a la atmósfera, ya sea como CO₂ o como metano.

Las **selvas altas y medianas**, como ecosistemas tropicales, se encuentran considerados dentro del mayor sumidero terrestre de carbono y con más alta productividad (Jaramillo *et al.*, 2005); en la Cuenca, almacenan un total de 37'722,842 MgC, contribuyendo así con el 20.2% del total. Los valores para la SAMS y la SMSC fueron tomados de coberturas homólogas de Los Tuxtlas (Veracruz) en la primera y de Chamela (Jalisco) en la segunda; en estos sitios, dichos autores reportan que, a pesar de presentarse una significativa diferencia de precipitación anual (~700 mm y ~ 4000 mm), ambos poseen niveles

similares en su almacén de carbono; las condiciones de humedad de Chamela son similares e incluso más secas que las de la SMSC (entre 700 y 1300 mm, según el SMN: <http://smn.cna.gob.mx/>) en la cuenca, mientras que las relativas a la SMSC se reportan muy inferiores a Los Tuxtlas (de 750 a 1500 mm, según el SMN: <http://smn.cna.gob.mx/>).

Las **selvas bajas y subcaducifolias**, con menores contenidos por hectárea (Jaramillo *et al.*, 2005, reportan una diferencia de almacén entre las semidecíduas y las decíduas de hasta tres veces más) pero mayor extensión superficial, participando con el 15.4% del total (28'707,279 Mg C), que llega a 28.7% si se contabiliza la comunidad secundaria. Los factores que determinan la significativa productividad en estas selvas son su alta biodiversidad, sus densidades arbóreas y su grado de conservación (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008). Es importante señalar que los valores para estas comunidades fueron tomados de estudios específicos para la zona, en el caso de la SBC (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008), y para selvas similares en el suroeste de México (Jaramillo *et al.*, 2005).

Resalta además el hecho de que la **SBCvs** presente un mayor contenido de carbono por hectárea que los matorrales, lo cual contradice a Ortiz y Kanninen (2000) en cuanto que las coberturas primarias acumulan mayores cantidades de biomasa que las secundarias. No obstante, es necesario apuntar que Etcheverset *al.* (2001) señalan que el suelo (que es el principal sumidero de esta selva) en ecosistemas de vegetación natural que han sido alterados resulta un almacén altamente significativo. En su trabajo, encontraron mayores cantidades de carbono en bosques jóvenes (producto de la remoción de bosques primarios) que en otros de mayor edad y con ciertos niveles de manejo (extracción de leña o agricultura). Esto es importante de señalar para las cuestiones de manejo de los sitios alterados, ya que otras coberturas vegetales en sucesión en la cuenca muestran mayor captación que sus homólogas primarias, como las de bosque mixto de pino y encino y las zonas agrícolas en abandono. A este respecto, Jaramillo *et al.* (2005) estiman que, para que las selvas tropicales secundarias mexicanas alcancen un 90% de su biomasa original, deben pasar hasta 79 años desde el momento del abandono del terreno; esto es lo que les da un alto potencial como sumideros de carbono, lo cual depende de la conservación y manejo sostenible de estos ecosistemas.

Las comunidades de **bosques templados** son otro grupo de alta aportación por hectárea al almacén de carbono en la cuenca. Destacan primero los bosques de coníferas y de *Junniperus* (BT), seguidos del bosque de niebla, todos con aportaciones mayores de 200 Mg C/Ha; mientras que en los bosques mixtos se estimaron 136 Mg C/Ha. Estas estimaciones son consistentes con los valores reportados para Chiapas por De Jong (2001), quien, sin incluir los contenidos de carbono del suelo, señala rangos de 243 a 566 tC/Ha; aunque sus resultados son mayores para bosques de encino, con 232 a 818; así como 229 a 596 para los mixtos, y aún para los degradados y fragmentados, de 168 a 402. En la cuenca, el bosque de encino resalta por una menor producción por hectárea, pero por su superficie supera en cuanto a su aportación total a la del BP; en conjunto con el bosque mixto primario, contribuyen con el 13.8% del total de la cuenca, que aumenta a 20.02% si se suma la cobertura secundaria, el BMM y el BT; cabe destacar que este último bosque ocupa una superficie muy reducida, de forma que la aportación individual es de apenas el 0.46%. Etcheverset *al.* (2001) reportan una mayor producción en el BMM de la región Mazateca (en Oaxaca), debido a que en este trabajo se utilizó el carbono de la biomasa aérea estimado por Rodríguez *et al.* (2006) para El Cielo; en este sitio de la cuenca los autores obtuvieron las mediciones sólo de los fustes de árboles, y sostienen que es un almacén de alta permanencia debido a las condiciones de alta humedad persistentes en su área de estudio.

Es importante aclarar que Talliset *al.* (2008) sugieren que en la modelación a través de InVest 1.005 no se evalúe la fijación de carbono en **material herbáceo o de cultivos no leñosos**, ya que no representa un depósito a largo plazo, pues el carbono de éstos suele reciclarse muy rápido. No obstante, en este trabajo se evaluaron los sistemas agrícolas de anuales (de riego y de temporal), sumados a los permanentes (de carácter leñoso), a los pecuarios (PZC) y a los pastizales inducidos, debido a que se está analizando el carbono almacenado en un momento del tiempo, correspondiente al mapa del LULC (Noviembre 2011). De esta forma, se encontró que el contenido de carbono por hectárea en **los sistemas agropecuarios** es tanto o más alto que algunos ecosistemas naturales, especialmente los más xerófilos; no obstante, y debido a su extensión superficial, aportan un importante almacén de carbono, equivalente al 29.1% del total en la cuenca. Sin embargo, es necesario señalar que el sistema agrícola con mayor almacén por hectárea es precisamente el de carácter permanente, que aporta 165.43 MgC/ha, constituido en la cuenca principalmente por sembradíos cítricos y huertas de mango; estos son los de menor extensión en la cuenca con respecto a los otros sistemas agropecuarios, por lo que su aportación total es también la más baja relativamente.

Los sistemas anuales de cultivo, son un almacén de carbono temporal en la cuenca, cuya biomasa en general suele reciclarse pronto con su uso como pastura. Etcheverset *al.* (2001) detectaron este tipo de cultivo contienen mayores cantidades de carbono que los sistemas naturales. Estos autores se muestran sorprendidos al encontrar el doble de la cantidad de carbono almacenada en labranza tradicional de la región Mixe de Oaxaca respecto a los sistemas naturales (bosques secundarios jóvenes), mencionando que la mayor parte proviene del suelo, explicando esta distribución con la profundidad del suelo más que por otros factores tales como las especies del bosque, su edad o sus condiciones de manejo. Encontraron que los sistemas agrícolas anuales con labranza tradicional suelen acumular cantidades similares de carbono que los sistemas boscosos de su estudio (en Oaxaca), pero la diferencia es que en el bosque se acumula en la biomasa, mientras que en la labranza lo hace en el suelo; esto lo explican relacionando el contenido de carbono con la profundidad del suelo que se utiliza en los sistemas agrícolas de temporal.

Los cuerpos de agua perennes, como los humedales con vegetación emergente, logran fijar un importante contenido de carbono por hectárea, con más de 205 Mg, contando sólo con las aportaciones de los sumideros analizados. En estos sistemas, el mayor reservorio se encuentra en el suelo, con el 86% del total, seguido de la materia orgánica en descomposición, con 8%, mientras que el resto es aportado entre las macrófitas, sus raíces y el fitoplancton. Erich *et al.* (2010-45) analizaron algunos “suelos subacuáticos” de sistemas lacustres y estuarinos, sosteniendo la importancia de no clasificarlos sólo como “sedimentos”, sino como suelos capaces de actuar como un sustrato dentro del sistema, para así poder ser estudiados en forma similar a los de carácter “sub-aéreo”; introducen el concepto de *underwaterlandscapes*, “paisajes sub-acuáticos” que con una traducción más contextualizada hacia el manejo podría ser “terreno sumergido”, que es el enfoque que se le dio al incorporar los cuerpos de agua en esta parte del trabajo. Siguiendo esta idea, el carbono fijado por los sedimentos se extrapoló al reservorio de la materia orgánica en descomposición y la vegetación sumergida y el plancton se hicieron equivalentes a la biomasa aérea. Evaluados de esta forma, los cuerpos de agua aportan el 3.4% del carbono almacenado en la cuenca.

Al contar con una menor cobertura y densidad arbórea, **los ecosistemas de mayor afinidad xerófila** presentan en general los más bajos almacenes de los sistemas naturales estudiados. Los valores estimados no superan los 70 Mg/Ha, excepto la comunidad primaria de mezquital, con poco más de 113. Nava y Jurado (2009-41) informan que los valores de productividad foliar obtenidos en campo para matorrales semidesérticos tamaulipecos resultaron menores en comparación de otros sistemas arbóreos tropicales; no obstante, los encontrados en el sistema radicular son mayores a otros ecosistemas, lo cual coincide con Bart y Klennedson (1982-36), quienes refieren que el extensivo sistema radicular del mezquite le permite una mayor absorción de nutrientes, que resulta en una mayor concentración de carbono y nitrógeno. Es importante señalar que existen evidencias de que los sistemas arbóreos de las sabanas semiáridas incrementan el carbono del suelo, mejorando sus propiedades físicas y aumentando con ello la productividad del terreno, por lo que debe ponerse más atención al manejo de las especies arbóreas de estos ecosistemas (Geesing, *et al.*, 2000).

En relación a este tipo de vegetación y su dinámica de captura/almacén de carbono, Rahimef *al.* (2010) señalan que, el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera representa una ventaja para las plantas con metabolismo C3 (principalmente elementos leñosos) sobre las de tipo C4 (citando aMayeuxet *al.*, 1991); esto aporta argumentos a la hipótesis de Archer (1994) de que el incremento de las especies leñosas de los matorrales y pastizales del noreste de México y el sur de EEUU se debe a más bien a cambios atmosféricos y no a una mejora en el manejo.

Lal y Augustin (2012-35) mencionan que **los centros urbanos** en crecimiento consumen numerosos recursos naturales para su desarrollo y actividades cotidianas, generando grandes cantidades de desechos y contaminación, lo que constituye el principal conductor antropogénico del cambio climático. Lal (2012, en Lal y Augustin, 2012) refiere que la urbanización influye sobre el ciclo global del carbono porque altera las fuentes y sumideros de carbono, debido a los procesos urbanizadores que modifican la geoquímica del suelo, tales como superficies impermeables, sistemas de agua potable y drenaje, alteraciones drásticas en el paisaje y perturbación de procesos ecológicos.

A pesar de su pequeña superficie relativa, son las mayores fuentes de emisión de GHCs, pero al mismo tiempo resultan ser un importante sumidero de carbono, por lo que con un adecuado manejo y restauración de los ecosistemas que se encuentran en esas áreas, se puede también contribuir a la reducción de emisiones y generar otros SSAA (Lal (2012, en Lal y Augustin, 2012). En la cuenca, el contenido de carbono en las manchas urbanas alcanzó 107.2 Mg/Ha, cantidad superior a la de la mayoría de las comunidades vegetales más secas, así como a otras más húmedas como la SAMS y la vegetación riparia; esto coincide con lo reportado por Churkinaet *al.* (2009, enLal, 2012-35), quienes estimaron que el carbón almacenado en los asentamientos humanos puede ser de dos a tres veces mayor que en áreas rurales, y de 1.7 a 5.8 que en selvas tropicales; mientras que Roshetko *et al.* (2002-34) mencionan que puede alcanzar valores similares a los encontrados en superficies con vegetación secundaria.

La vegetación urbana se encuentra expuesta a temperaturas y concentraciones de contaminantes mayores que en el campo, lo que puede reducir su tasa fotosintética, pero también existe una más alta concentración de CO₂, por lo que, en contraparte, pueden aumentar considerablemente su productividad, tal como reportaZiskaet *al.* (2004, en Lal), quienes estimaron un 115% de aumento en la biomasa aérea de las plantas anuales urbanas comparadas con las rurales. Por otra parte, los suelos de estos asentamientos,

contienen 64% del carbono almacenado Churkina *et al.* (2009, en Lal, 2012-35), lo que se debe a que grandes cantidades de carbono se integran definitivamente al suelo cuando éste es sellado con materiales firmes como el cemento y otros Lal (2012, en Lal y Augustin, 2012-p10).

Las **zonas quemadas** representadas en el modelo reportan un bajo valor de almacén de carbono, con 22 Mg/Ha, e incluyen áreas afectadas por incendios en comunidades boscosas, principalmente en la cuenca alta; así como extensas zonas de matorrales y vegetación secundaria de selvas que en octubre de 2011 no se habían recuperado de la sequía; además de predios agrícolas siniestrados y de pastizal, estos ubicados principalmente en la zona temporalera, que por la sequía de ese año reportaron pérdidas totales (Hernández, 2011. En prensa: <http://eldiariodevictoria.com.mx/2011/12/07/siniestra-sequia-90-de-cosechas/>: 12-ene-2012). En su estudio, Kauffman *et al.* (2009) exponen las características dinámicas de la biomasa y los flujos de CO₂ en sitios que han sido afectados por incendios, resaltando el hecho de que, en los trópicos, dichos siniestros en conjunto con la deforestación por otras causas, contribuyen a que las emisiones de carbono sean mayores que las que capturan esos sitios al recuperarse con la formación de bosques secundarios. Refieren que en las zonas secas (como algunas de las siniestradas en el área de estudio) donde las masas boscosas son más pequeñas, se consume del 62 al 82% de la biomasa aérea; esta situación es parecida a la que enfrentan los bosques secundarios jóvenes, que son más vulnerables a la deforestación. En particular, Vargas *et al.* (2008-37) encontraron que, para que un terreno de SBC quemado recupere su biomasa total a un 90% de la de una selva madura, se requiere un lapso de 70 años sin que se presenten nuevos siniestros; 50 años son necesarios para la recuperación de esa selva en cuanto a contenido de carbono.

Por su parte, existen sitios con incendios recurrentes, encontrados en las zonas boscosas y de pastizales de las zonas montañosas como los clasificados por CONABIO/CONAFOR (Gob.Edo., 2011) con muy alta vulnerabilidad a incendios en la cuenca, así como las zonas selváticas con vulnerabilidad alta; en esos lugares, la vegetación secundaria se convierte en una fuente de emisiones de CO₂ por varios años, como afirman Kauffman *et al.* (2009). Estos mismos autores mencionan que, en el caso de los incendios recurrentes en selvas altas y medianas, son generalmente provocados para eliminar la materia orgánica o para usarlos en pastoreo; en éstos se libera alrededor de 39% de la biomasa en la primera ignición, quedando una mayor cantidad de madera muerta, que es el sumidero de carbono remanente del siniestro.

En países del trópico húmedo como Camerún, Brasil e Indonesia, Palm *et al.* (1999) en su estudio de sucesión de terrenos siniestrados por el fuego, señalan que, contrario a lo que sucede en los terrenos manejados con labranza tradicional en Oaxaca (que refieren Etcheverset *al.*, 2001), en los sitios siniestrados en sucesión el potencial de secuestro se encuentra en la biomasa y no en el suelo.

Es necesario resaltar la importancia de aplicar una adecuada estrategia de prevención de incendios forestales en el área de estudio, ya que como señala Kauffman *et al.* (2009), los incendios recurrentes tienen en los flujos de carbono ya que en los primeros 4-10 años desde el primer incendio, las emisiones llegan a igualar el contenido de carbono de la biomasa aérea del bosque primario; además, los círculos viciosos del cambio climático, el C.U.S. y el aumento de la fragmentación de ecosistemas “pueden resultar en incremento de la superficie incendiada, así como en la cantidad de biomasa consumida por el fuego por unidad de área”, efectos que pueden “limitar la capacidad de los bosques tropicales para secuestrar carbono y nutrientes”.

En cuanto a la **captura de carbono**, se estimó que los ecosistemas de la cuenca fijaron una cantidad bruta (antes de balance) de 4'495,846.79 MgC en el año 2011. La obtención de la captura neta quedó fuera del alcance de esta investigación, ya que no se contó con datos suficientes para realizar un balance fuente/sumidero; a este respecto, Pan *et al.* (2011) refieren que se desconoce el tamaño y localización exactos de los sumideros terrestres de carbono, y que las mayores incertidumbres se presentan en los trópicos; señalan que incluso las significativas emisiones brutas producto de la deforestación tropical "son usualmente despreciadas" en los balances, debido a que más de la mitad se compensa por la captura de los bosques tropicales en recuperación, ya sea de deforestación o tala, o en sitios agropecuarios en abandono.

Dentro del mismo contexto de los autores arriba citados, y considerando como potenciales sumideros dentro de un balance teórico a los ecosistemas nativos de la cuenca, sus coberturas en sucesión (incluyendo las zonas quemadas), los cuerpos de agua y agricultura permanentes (Cuadro 4), se obtiene una fijación de 3'067,927.44, lo que representa el 68.2% de la captura bruta total en la cuenca. El restante casi 32% fue secuestrado por coberturas antropogénicas de uso agropecuario, que puede considerarse tienen una mayor probabilidad de convertirse en fuente de emisiones; así como las zonas inundables, que al secarse (o drenarse) emiten el carbono secuestrado (Hernández, 2010).

Cuadro 4. Captura bruta de carbono en los diferentes LULC de la cuenca, con la característica más probable al ser evaluados dentro de un balance.

LULC	Mg C/año	BALANCE	LULC	Mg C/año	BALANCE	LULC	Mg C/año	BALANCE
AGR	711,219.60	Fte/Sum	BMM	144,285.00	Sumidero	MDR	44,057.60	Sumidero
BE	486,403.44	Sumidero	AGTA	132,601.00	Fte/Sum	TUL	38,773.68	Sumidero
SBC	451,951.50	Sumidero	MSM	85,727.16	Sumidero	PZI	27,175.00	Fte/Sum
SMSC	437,525.00	Sumidero	MZQvs	83,148.40	Sumidero	MZQ1	14,953.52	Sumidero
BPE	421,357.44	Sumidero	QUE	79,830.00	Sumidero	BT	5,542.80	Sumidero
PZC	251,616.30	Fte/Sum	SBEhzhch	65,390.76	Sumidero	INU	1,150.20	Fte/Sum
AGTApzi	225,477.45	Fte/Sum	PALM	61,507.02	Sumidero	URBA	535.76	Fte/Sum
SBCvs	199,380.00	Sumidero	AGUA	55,413.00	Sumidero	RIPA	486.00	Sumidero
SAMS	189,555.20	Sumidero	BEBPEvs	54,202.32	Sumidero	MAN	462.60	Sumidero
BP	176,878.24	Sumidero	AGTP	49,240.80	Sumidero	DESN	0.00	-

Las manchas urbanas, son un caso particular, ya que en un balance de carbono, son consideradas *per se* como las zonas con mayores emisiones de GEI (Lal y Agustín, 2012), por lo que su fijación anual como ecosistema podría ser menor que sus emisiones. Esto no necesariamente ha sido así durante el desarrollo de estos ecosistemas artificiales, pero sin duda aumentó considerablemente con el establecimiento de las zonas industriales, el crecimiento de la mancha urbana y la introducción masiva de automóviles y medios de transporte. Por esta razón, las zonas urbanas se consideraron en este estudio como posible fuente de emisiones, tomando en cuenta las condiciones actuales, pero al mismo tiempo como un almacén de tipo permanente en la cuenca, por la menor probabilidad que existe de que cambie a otro uso de suelo y se libere el carbono almacenado en los suelos y estructuras, como sucede en los terrenos agrícolas.

De forma similar a las manchas urbanas, los suelos desnudos fueron evaluados como almacén equivalente a los suelos urbanos, pero sin dinámica de fijación de forma similar a las dunas de arena, como sugieren Xie y Leschen (2012). En caso de existir un cambio, podrían quedar cubrirse de vegetación nativa o cultivada, o bien ser urbanizados; por lo que su mayor probabilidad en un balance sería o como sumidero o quedar sin dinámica.

La agricultura de riego, con altas tasas de fijación anual y gran superficie en la cuenca, alcanzó la mayor captura bruta anual (más de 711 MgC anual); pero debido a que en la cuenca la mayor superficie de esta actividad se encuentra dedicada al cultivo de caña de azúcar, en las condiciones actuales de manejo y cosecha (como la práctica de la quema durante la zafra) el balance de carbono posiblemente resulte una fuente, de la misma forma que las zonas agrícolas de temporal y los pastizales inducidos y cultivados (dedicados estos últimos a la ganadería extensiva).

Cuestión aparte, y con mucho menores tasas de captura por su reducida superficie, son las zonas inundables y las manchas urbanas. Las primeras presentan riesgo de emisión debido a su alta dinámica de desecamiento, aunque su alta productividad y sus condiciones de humedad resultan ser sumideros muy significativos, de acuerdo con Bernal y Mistch (2012), quienes señalan que es importante dirigir estudios específicos para cada tipo de humedal, debido a las significativas diferencias de secuestro encontradas en su estudio. El IPCC (2006) señala que en los humedales una porción significativa de materia orgánica en descomposición emite metano a la atmósfera, pero las existencias netas de carbono dependen de la dinámica ambiental y/o de manejo que incidan en esos sitios, pudiendo incrementarse, reducirse o permanecer constantes. IPCC 2006 (vol4, c1,p1.8) Por su parte, en las manchas urbanas el riesgo no es tanto por su dinámica como ecosistema, sino porque las actividades con mayores emisiones de GEI contempladas por el IPCC (2006) se desarrollan principalmente en esos sitios: el sector energía, con una aportación del 95% del CO₂ emitido; los procesos industriales y el uso de productos; así como la generación de desechos.

Respecto a los ecosistemas nativos las coberturas primarias de bosques templados y de selvas capturan mayores cantidades de carbono tanto por su extensión como por las altas tasas reportadas en la literatura. No obstante, dichas tasas deberían ser inferiores que las de sus coberturas en sucesión, de acuerdo con *Pan et al. (2011)*, ya que en su estudio de los bosques mundiales como sumideros de carbono, encontraron que los bosques tropicales en regeneración son más potentes en la fijación, debido a la mayor dinámica de acumulación de biomasa en la fase de sucesión. *Peri et al. (2010, EN Peri, 2011)* demostraron que estas tasas se deben a la acumulación de carbono en los componentes arbóreos y el suelo del bosque, con el crecimiento de la vegetación, y que esto depende de la estructura del bosque dada por la proporción de la clase de coronas, la edad y la calidad del sitio. Por su parte, *Ortiz y Kanninen (2000)* coinciden con esto, pues encontraron que el bosque primario con manejo fija anualmente de 2.4 a casi 12 veces menos que el secundario y hasta 43 veces menos que las plantaciones. No obstante, en el presente análisis, no se encontraron estudios específicos para los ecosistemas de la cuenca y sus coberturas secundarias (los citados autores reconocen también la escasez de datos), por lo que, por una parte debieron buscarse datos en diferentes referencias para la primaria y la secundaria; y por otra parte, se asumieron y derivaron algunos valores de otros datos reportados.

BIBLIOGRAFÍA

- Barth, R. C. y J.O. Klennedson. 1982. Amount and Distribution of Dry Matter, Nitrogen, and Organic Carbon in Soil-Plant Systems of Mesquite and Palo Verde. *Journal Of Range Management*.
- Bernal, B. y W.J. Mitsch. 2012. Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities. *Global Change Biology*. Volume 18, Issue 5, pages 1636–1647, May 2012.
- Bezaury Creel, J.E. 2009. El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos. *The Nature Conservancy – Programa México*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 32 pp. México.
- Bouillon, S.; V.H. Rivera-Monroy; R.R. Twilley y J.G. Kairo. 2009. Mangroves. En Laffoley, D.d'A. y G. Grimsditch (eds). 2009. *The management of natural coastal carbon sinks*. IUCN, Gland, Switzerland. 53 pp.
- Boyd y Banzhaf, 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*. 616-626 pp.
- Churkina, G.; Brown, D.G. y Keoleian, G. 2009. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States. *Global Change Biology* 135-143 pp.
- CICC, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. 2007. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. México. Síntesis Ejecutiva. SEMARNAT-INE. 16 pp.
- CICC. 2009. México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. SEMARNAT-INE (Coordinadores) 274 pp.
- Alba, E. y M. Reyes, (1998) “La diversidad biológica de México: estudio de país 1998” en Capítulo 7. Valoración económica de los recursos biológicos del país. Disponible en: www.conabio.gob.mx/conocimiento/estrategi_nacionaldoctos/CAP7.PDF [accesado el 07 de enero del 2008]
- De Jong, B.H.J. 2001. Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en los Altos de Chiapas, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 33-38. En http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/02_De_Jong.PDF
- Donato, D.C.; J. B. Kauffman; D. Murdiyarsa; S. Kurnianto; M. Stidham y M. Kanninen. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience Letters*. Published online: 3 april 2011. Advance online publication. www.nature.com/naturegeoscience
- Erich, E., P. J. Drohan, L. R. Ellis, M. E. Collins, M. Payne y D. Surabian. 2010. Subaqueous soils: their genesis and importance in ecosystem management. *British Society of Soil Science, Soil Use and Management*.
- Jaramillo V. J., Angelina Martínez-Yrizar, Luz Piedad Romero-Duque, J. Boone Kauffman y Felipe García-Oliva. 2001. Los Stocks de Carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México.
- Geesing, D.; P. Felker y R.L. Bingham. 2000. Influence of mesquite (*Prosopis glandulosa*) on soil nitrogen and carbon development: implications for global carbon sequestration. *Journal of Arid Environments* 46:157-180.
- Gob. Edo, Gobierno del Estado de Tamaulipas. 2011. *Atlas de Riesgo del Estado de Tamaulipas*. 335 pp. Disponible en: <http://proteccioncivil.tamaulipas.gob.mx/atlas-de-riesgos-del-estado-de-tamaulipas/> : 08-jun-2012
- Hernández, M. E. 2010. Suelos de Humedales como sumideros de Carbono y Fuentes de Metano. vol. 28, núm. 2, abril-junio, 2010, pp. 139-147. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México*.
- Hernández, 2011. En prensa: <http://eldiariodevictoria.com.mx/2011/12/07/siniestra-sequia-90-de-cosechas/>: 12-ene-2012
- Herrera, 2012, en prensa: <http://www.presidencia.gob.mx/2012/07/mexico-ejemplo-de-sustentabilidad-a-nivel-mundial/>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.
- Jaramillo V.J., Angelina Martínez-Yrizar, Luz Piedad Romero-Duque, J. Boone Kauffman y Felipe García-Oliva. 2005. Carbon Stocks in Tropical Forest of Mexico. Póster. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Jerath, M. 2012. An Economic Analysis of Carbon Sequestration and Storage Service by Mangrove Forests in Everglades National Park, Florida. *FIU Electronic Theses and Dissertations*. Paper 702. <http://digitalcommons.fiu.edu/etd/702>
- Kayranli B., M. Scholz, A. Mustafa y A. Hedmark. 2010. Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: a Critical Review. *Wetlands* (2010) 30:111–124
- Kauffman, J.B.; Hughes, R.F. y Heider, C. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. *Ecological Applications*, pp. 1211–1222.
- Lal, R. 2012. Parte I. Urban Ecosystems and Climate Change. EN Lal, R. y B. Augustin. 2012. *Carbon Sequestration in Urban Ecosystems*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York
- Manzano, M.G., J., Cantú Vega, F.J. Silva Cavazos y J. Martínez Medina. 2009. Método Práctico para estimación de Biomasa y Carbono acumulado en poblaciones naturales de mezquite (*Prosopis Glandulosa*) en el Noreste de México. VI Simposio Internacional de Pastizales. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martínez Bravo, R. D. y O. R. Maserá C. 2003. La captura de carbono como servicio ecosistémico del Parque Ecológico Jaguaroundi: Una estrategia para la conservación y manejo de los recursos forestales. Laboratorio de Bioenergía, Centro de Investigación en Ecosistemas, UNAM.
- Návar-Cháidez, J. J. y E. Jurado- Ybarra. 2009. Productividad Foliar y Radicular en ecosistemas forestales del Noreste de México. *Revista Ciencia Forestal en México*. Vol. 34. Núm. 106.
- Ortiz, R. y M. Kanninen. 2000. Evaluación económica del servicio del sumidero de carbono en diferentes ecosistemas forestales. EN. Robles Valle, G.R.; K. Oliviera Barbosa y R. Villalobos Soto (Eds.) 2000. *Evaluación de los recursos forestales mundiales. Evaluación de los recursos forestales no madereros en América Central*. Documento de Trabajo 22 del Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. Departamento de Montes de la FAO. Roma.
- Palm, C.A.; P. L. Woome; J. Alegre; L. Arevalo; C. Castilla; D. G. Cordeiro; B. Feigl; K. Hairiah; J. Kotto-Same; A. Mendes; A. Moukam; D. Murdiyars; R. Njomgang; W. J. Parton; A. Ricse; V. Rodrigues; S. M. Sitompul y M. van Noordwijk. 1999. Carbon sequestration and trace gas emissions in slash-and-burn and alternative land uses in the humid tropics. Alternatives to Slash-and-Burn Programme Climate Change Working Group. Final report, Phase II. 17pp. The Consultative Group on International Agricultural Research Nairobi.
- Pan, Y; R. A. Birdsey; J. Fang; R. Houghton; P. E. Kauppi; W. A. Kurz; O. L. Phillips; A. Shvidenko; S. L. Lewis; J. G. Canadell; P. Ciais; R. B. Jackson; S. W. Pacala; A.D. McGuire; S. Piao; A. Rautiainen; S. Sitch y D. Hayes. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988 (2011): 988-993.
- Peters-Stanley, M.; K. Hamilton y D. Yin. 2012. Leveraging the Landscape. State of the Forest Carbon Markets 2012 Ecosystem Marketplace. 86 pp. Disponible en: http://www.foresttrends.org/publication_details.php?publicationID=3242 : 28/ene/2013
- Rahim Foroughbakhch, P.; G. J. Alanis Flores, J. L. Hernández Piñero y A. Carrillo Parra. 2010. The structure and function of vegetal ecosystems of semiarid areas in Northeastern Mexico. Chapter 2. In: *Structural Analysis*. Editor: M.L. Camilleri, pp. 21-50. Nova Science Publishers, Inc.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa. S.A.
- Rocha, A. V. y Michael L. Goulden. 2008. Why is marsh productivity so high? New insights from eddy covariance and biomass measurements in a Typha marsh. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (2009): 159-168.
- Rodríguez Laguna R., Javier Jiménez Pérez, Óscar A. Aguirre Calderón, Eduardo J. Treviño Garza. 2006. Estimación del Carbono almacenado en Bosque de Niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL / Vol. IX, No. 2*.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, J. Meza-Rangel, O. Aguirre-Calderón y R. Razo-Zarate. 2008. Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (2):215 -222.
- Roshetko, J.M., M. Delaney, K. Hairiah y P. Pumomosidhi. 2002. Carbon stocks in Indonesian homegarden systems: Can smallholder systems be targeted for increased carbon storage?. *American Journal of Alternative Agriculture*. Vol 17, N° 2.

- SEMARNAT-DOF, Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2004. ACUERDO que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales (PSA-CABSA). Diario Oficial de la Federación del Miércoles 24 de noviembre de 2004. Segunda Sección (89-111). México.
- SEMARNAT, 2012. Decreto por el que se expide la Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación del Miércoles 6 de junio de 2012. Segunda Sección: 1-29.
- Tallis, H.; Karelva, P.; Marvler, M. y Chang, A. 2008. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28): 9457-9464
- Tallis, H.T.; T. Ricketts; E. Nelson; D. Ennaanay; S. Wolny; N. Olwero; K. Vigerstol; D. Pennington; G. Mendoza; J. Aukema; J. Foster; J. Forrest; D. Cameron; E. Lonsdorf y C. Kennedy. 2010. INVEST 1.005 beta User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford. 162 pp.
- Tallis, H.T.; T. Ricketts; A.D. Guerry; E. Nelson; D. Ennaanay; S. Wolny; N. Olwero; K. Vigerstol; D. Pennington; G. Mendoza; J. Aukema; J. Foster; J. Forrest; D. Cameron; E. Lonsdorf ; C. Kennedy; G. Verutes; C. K. Kin; G. Guannel; M. Papenfus; J. Toft; M. Marisk; J. Bernhardt.; S. Wood y R. Sharp. 2011. INVEST 2.1 beta User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford. 260 pp.
- Vargas, R; Allen, M.F. y Allen E. B. 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* 109-124 pp
- Xie, Y; Leschen, A. 2012. Waquoit Bay National Estuarine Research Reserve Greenhouse Gas Calculator for Land-holding Entities Instruction Manual. National Estuarine Research Reserve.