



Programa Mexicano del Carbono

PLAN CIENTÍFICO DEL PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO

Editores Arturo Muhlia Melo y Felipe García-Oliva



El Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono (PMC) fue escrito por el Comité Científico Ampliado del Programa:

Arturo Muhlia, Coordinador del PMC, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
Felipe García-Oliva, Coordinador del Comité Científico del PMC, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ben H. J. de Jong, El Colegio de la Frontera Sur.

Judith Domínguez, El Colegio de México.

Elva Escobar, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Jorge D. Etchevers, Colegio de Posgraduados.

Gilberto Gaxiola, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

José Martín Hernández, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California.

Rubén Lara, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

Mario Manzano, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey.

Amparo Martínez, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

Francisco Ocampo, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

Patricia Romero-Lankao, Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Xochimilco .

Christopher Watts, Universidad de Sonora.

PLAN CIENTIFICO DEL PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO

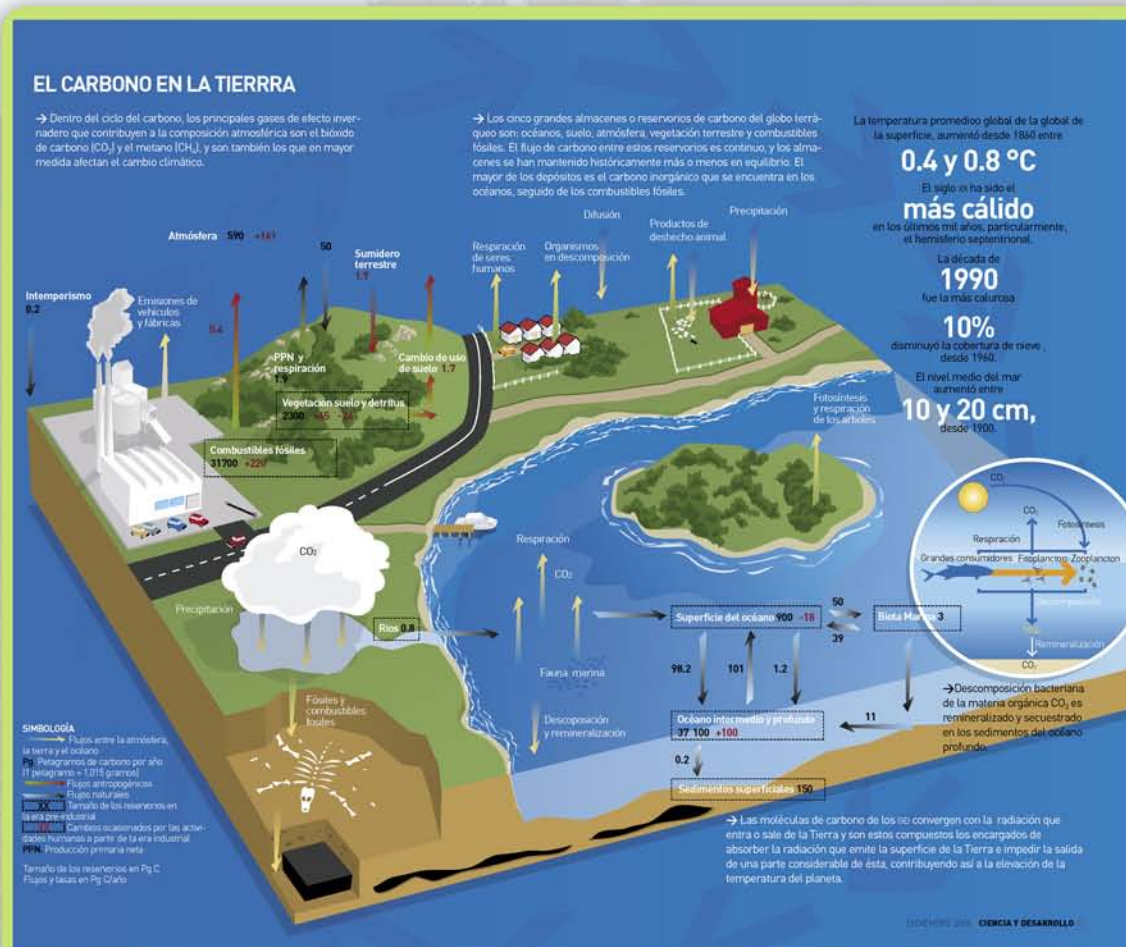
TEMA 1. INTRODUCCION

1.1. Presentación

Los cambios en la dinámica del ciclo del carbono se han identificado entre las principales causas que están generando el cambio climático global. El estudio del ciclo del carbono requiere de la participación de científicos de varias disciplinas, como ecólogos marinos y terrestres, agrónomos, ingenieros forestales, físicos, geógrafos, oceanógrafos, matemáticos y científicos sociales, entre otros.

Actualmente, las actividades humanas están determinando en gran medida los flujos y la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Entre ellas destacan la industrialización, el transporte, la quema de la biomasa vegetal, los cambios de uso del suelo y la deforestación. Para poder enfrentar los problemas derivados del Cambio Climático Global, es necesario que estas prácticas tengan que ser reorientadas estratégicamente. Sin embargo, para tener bases sólidas para reorientar las actividades humanas es necesario incrementar el conocimiento y el entendimiento de cómo el ser humano interactúa con este ciclo y cómo la relación carbono-sociedad puede ser modificada.

En forma similar que a nivel global, los ecosistemas terrestres y acuáticos de México también sufren procesos de alteración, producto de las actividades humanas y de las perturbaciones naturales. En general podemos definir cuatro principales actividades involucradas en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en México: generación y consumo de energía fósil, cambios en los usos del suelo, producción de cemento y actividades agropecuarias (e.g. ganado).



En efecto, los bosques y selvas adecuadamente conservados y manejados, pueden almacenar cantidades muy significativas de carbono, fijando este elemento en la vegetación en pie (el cual constituye aproximadamente el 50% de la madera y de la materia orgánica) y en los suelos (Brown et al., 1996). Basta señalar que el carbono orgánico acumulado en el primer metro del suelo alcanza según Eswaran et al. (2003) a 1550 Pg C, mientras que el carbono total sería del orden de 2300 Pg (Sabine et al., 2003), es decir que cerca del 75% de todo el carbono terrestre se encuentra en este componente de los ecosistemas (Herderson, 1995). En la vegetación en pie, el carbono se almacena inicialmente en los árboles de los bosques y después de su aprovechamiento en productos casi permanentes, tales como muebles, madera para construcción y papel. Al proporcionar fuentes de energía renovable como la leña, los bosques y las plantaciones dendro-energéticas contribuyen a disminuir y eventualmente a evitar, a nivel regional, el uso de combustibles fósiles y sus emisiones asociadas (Sheinbaum y Masera, 2000; IPCC, 2001). Por el contrario, la remoción de la vegetación terrestre de manera no planeada y la conversión del uso del suelo forestal a usos competitivos, como la agricultura y la ganadería, liberan a la atmósfera una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Por tanto, el mantenimiento de la cubierta forestal natural y el establecimiento complementario de plantaciones en áreas desprovistas de árboles constituyen una estrategia de la mayor relevancia para mitigar los efectos del cambio climático (de Jong et al., 1997; Sheinbaum y Masera, 2000; Brown et al., 2006).

Al igual que los reservorios terrestres el manejo adecuado de los reservorios naturales acuáticos tanto marinos como continentales, zonas costeras, bahías y esteros también forma parte de una estrategia relevante para la mitigación y la adaptación de los efectos del cambio climático relacionados con el ciclo del carbono.

1.2. Justificación del Plan Científico del PMC

La presentación de información sobre emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (GEI) es un compromiso contraído por México, ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y como tal debe ser cumplido en tiempo y forma. México como parte no incluida en el grupo Anexo 1 de la Convención (no Anexo 1) está obligado a presentar Comunicaciones Nacionales en conformidad con un calendario decidido por la Conferencia de las Partes. Así mismo, los países no Anexo 1 también pueden presentar voluntariamente Inventarios de emisiones de GEI. Una vez entregados los informes al CMNUCC, son sometidos a varias verificaciones y controles de coherencia, así como son objeto de revisiones técnicas por equipos internacionales de expertos.

Las comunicaciones y los inventarios deben contener datos de emisiones de bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). México como país no Anexo I, debe presentar datos sectoriales sobre energía, procesos industriales, residuos, agricultura, uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura (USCUTS). Uno de los problemas más graves que enfrenta México para cumplir con la obligación contraída con la CMNUCC es la escasa disponibilidad de información para elaborar los informes requeridos y en los casos en que está disponible, conlleva un alto grado de incertidumbre.

A pesar que nuestro país no se encuentra en Anexo I debe considerar la reducción y mitigación de las emisiones de GEI, ya que se encuentra entre los 15 países con mayores emisiones de estos gases a nivel mundial. De acuerdo a las cifras reportadas por la IEA (Agencia Internacional de Energía) para el 2003, México ocupa el lugar 12 a nivel mundial en las emisiones de CO_2 por quema de combustibles fósiles, con un total de 374.3 millones de toneladas de CO_2 ó el 1.5% de las emisiones (INE 2005). Por todo lo anterior, es importante que México cuente con un Programa que coordine la investigación y la implementación de políticas relacionadas con el ciclo del carbono.

1.3. Antecedentes

El conocimiento del ciclo del carbono a nivel país, es fundamental por su relación con el Cambio Climático Global. No sólo es indispensables para resolver numerosas interrogantes que la ciencia y la sociedad demandan (INEGEI, 2006), sino para conocer el estado dinámico que guarda el CO₂ en los ecosistemas acuáticos y terrestres del país y a partir de esta información establecer políticas tendientes a predecir su vulnerabilidad al Cambio Climático, así como para establecer con la debida anticipación, las estrategias de mitigación y de adaptación requeridas para aminorar los efectos negativos que los cambios causarán.

Para ello se considera imprescindible establecer un mecanismo que coordine e impulse los esfuerzos de investigación relacionados con los aspectos físicos, geoquímicos, biológicos y sociales del ciclo del carbono en el país. El primer paso fue dado en el 2005, cuando un grupo de aproximadamente 120 investigadores pertenecientes a 27 instituciones de investigación del país conformó el Programa Mexicano del Carbono (PMC), http://cambio_climatico.ine.gob.mx/pmc/index.html

TEMA 2. OBJETIVOS Y TEMAS PRIORITARIOS DEL PMC

2.1. Objetivo General

El estudio de la dinámica del C en los diferentes ambientes de México y sus interacciones socio-ambientales.

La dinámica considera: flujos, almacenes (cantidades) y procesos involucrados en los flujos y almacenes.

2.2. Objetivos Particulares

1. Cuantificar el carbono C almacenado en los principales ecosistemas de México.
2. Cuantificar los flujos internos y externos de C en los principales ecosistemas de México
3. Calcular los balances de C en los principales ecosistemas de México.
4. Determinar la variabilidad espacial y temporal de los flujos y los balances de C.
5. Estudiar los procesos naturales y antrópicos que controlan los flujos y almacenes de C en los principales ecosistemas de México y cómo cambian en el tiempo.
6. Generar diferentes escenarios de la dinámica de C para orientar la toma de decisiones.
7. Proveer las bases científicas para la mejor gestión del C en México
8. Proveer conocimientos sólidos de la dinámica social asociada a los procesos de degradación de los ecosistemas que inciden en la dinámica de C.
9. Difundir el conocimiento generado por el Programa Mexicano del Carbono a los diferentes actores.
10. Formar parte del Programa Conjunto Norte Americano del Carbono (JNACP) con Canadá y Estados Unidos, así como contribuir a otros programas Internacionales.

2.3. Temas prioritarios del PMC

El Programa está integrado por cuatro áreas temáticas que abordan distintos aspectos relacionados con el estudio del ciclo del C. Los temas prioritarios por áreas temáticas son:

A. Dimensión Humana, cuyo objetivo es entender las determinantes y consecuencias sociales de los cambios en los vínculos entre el ciclo del C, el sistema climático y la sociedad. Se plantea la realización de los siguientes estudios:

a) Determinantes de primer y segundo orden de la emisión de GEI por el "uso" de energéticos y por cambios en los usos de suelo principalmente. Destacan entre las determinantes de primer orden la generación y producción de energía, cambio de uso de suelo, procesos industriales y actividades agropecuarias. Entre las determinantes de segundo orden destacan: dinámicas demográficas, crecimiento económico, desarrollo tecnológico, desarrollo urbano y dinámicas institucionales. Se plantea la realización de los siguientes investigaciones:

i. Estudiar la contribución espacio temporal de las actividades humanas en los almacenes y flujos de carbono en los ecosistemas terrestres, marinos y acuáticos continentales de México; ii. Cuantificar las contribuciones temporales y espaciales de actividades emisoras; iii. Determinar las concordancias y discordancias entre escalas. Estos temas se insertan en la pregunta ¿qué se sabe sobre el ciclo del carbono en México?

b) Impactos regionales y sectoriales de los cambios en el ciclo de carbono y el sistema climático (zonas costeras, ciudades, agricultura, agua, bosques). Los temas responden a la pregunta ¿Cuáles son los impactos de las actividades antrópicas en las diferentes regiones del país?

c) Percepciones y respuestas sociales (mitigación y adaptación) planeadas y espontáneas. Temas clave aquí son: i. Relaciones entre mitigación, adaptación y desarrollo sustentable; ii. Diseño y evaluación de gestión de proyectos de captura de carbono vía manejo de ecosistemas (bosques y mares por ejemplo) y sus servicios ambientales; y iii. Diseño y evaluación de programas de alerta, emergencia ante desastres, salud pública y pronósticos climáticos. El tema se vincula con la discusión en torno a qué hacer.

d) Herramientas de análisis y de gestión. Asuntos claves son i. construcción de un lenguaje asequible a distintas disciplinas y sectores sociales; ii. escenarios, medición, balances e inventarios, identidad Kaya, modelación de relaciones entre sociedad, ciclo de carbono y sistema climático.



B. Ecosistemas Acuáticos, que incluyen a los ecosistemas marinos y de aguas continentales. Se plantea la realización de los siguientes estudios:

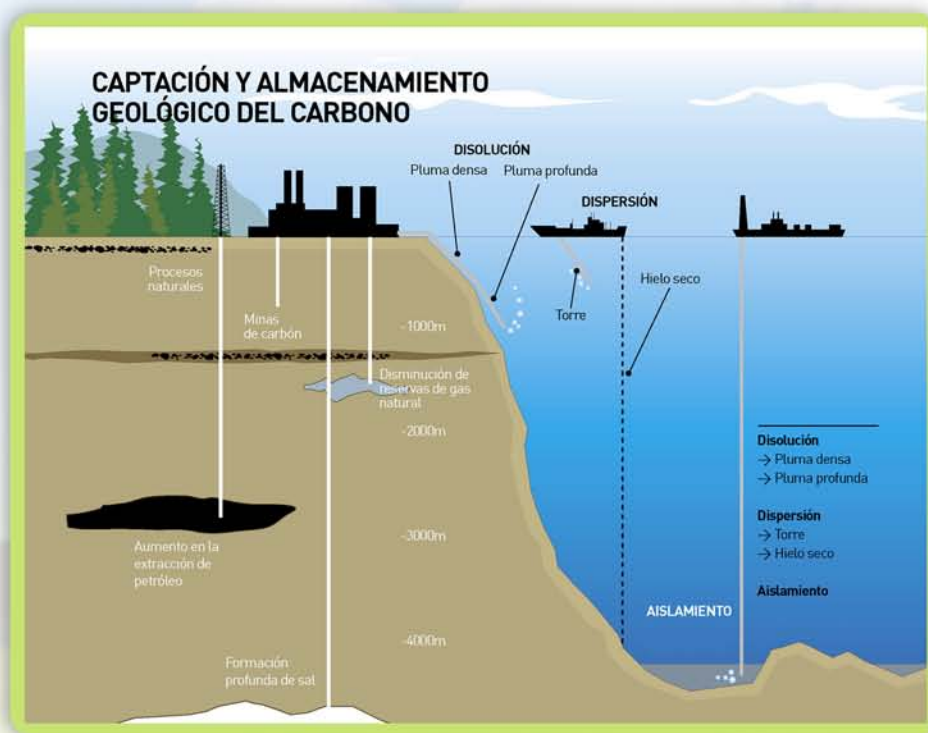
- a) Conocer la variabilidad espacio-temporal del carbono inorgánico en mares y costas mexicanas.
- b) Cuantificar la transferencia del carbono por procesos biológicos en mares y costas mexicanas.
- c) Cuantificar el intercambio del flujo de carbono en la zona costera-océano del Pacífico y Golfo de México.
- d) Llevar a cabo evaluaciones de flujos de carbono en el fondo marino del Golfo de México.
- e) Flujo del carbono en márgenes continentales.
- f) Dinámica del carbono en aguas continentales.
- g) Proponer modelos de manejo de reservorios acuáticos marinos y continentales y proveer las bases científicas para los tomadores de decisiones.
- h) Reportes periódicos del estado del océano y aguas epicontinentales en aspectos de acidificación.
- i) Desarrollo de herramientas de integración de la información y conocimiento a través de fronteras interdisciplinarias para la comprensión de las diversas interacciones y dinámica compleja de los mares costeros, mar abierto y cuerpos de agua.

C. Ecosistemas Terrestres. Se plantea la realización de los siguientes estudios:

- a) Estudiar la dinámica del carbono en los ecosistemas terrestres (Diagnostico):
 - i. Patrones geográficos de los flujos del C
 - ii. Variabilidad espacial y temporal de los flujos del C.
- b) Determinar cuáles son los procesos que controlan las fuentes y almacenes del C y cómo cambian estos procesos en el tiempo, desarrollar Modelos de diagnóstico y predictivos.
- c) Proponer modelos de manejo de reservorios terrestres y proveer las bases científicas para apoyar a los tomadores de decisiones.

D. **Atmósfera.** Se plantea la realización de los siguientes estudios:

- Medir y cuantificar los flujos atmosféricos del carbono de los principales ecosistemas terrestres y marinos.
- Medición y cuantificar los flujos horizontales de C en la atmósfera.
- Estudiar la variabilidad temporal de los flujos de C y su relación con factores climáticos.
- Estudiar la influencia de factores climáticos o meteorológicos en los procesos atmosféricos en los que participan gases de efecto invernadero (principalmente CO₂ y CH₄) en los diferentes reservorios de México.



E. **Integración.** Se propone la realización de investigaciones para resolver cuatro preguntas transversales a todas a las áreas temáticas. Estas investigaciones van a permitir integrar el conocimiento sobre el ciclo del C. Estas investigaciones son:

- Llevar a cabo la integración de los diagnósticos de los sistemas naturales y sociales. ¿Que se sabe sobre el ciclo del C en México?
- Hacer reconstrucciones del pasado, análisis de los procesos en el presente y la utilización de modelos de simulación para generar escenarios futuros en México. ¿Cuáles son los impactos antropogénicos y ecológicos sobre el ciclo del C en México?
- Plantear estrategias de mitigación y de adaptación con base en el conocimiento del ciclo del carbono en México. ¿Cómo podemos enfrentar los problemas del Cambio Global? ¿Cómo podemos gestionar mediante políticas de mitigación y adaptación las contribuciones de nuestro país a los cambios en el ciclo del carbono y el sistema climático?
- Utilizando herramientas metodológicas y teóricas, a través de estudios multidisciplinarios, estimar el grado de incertidumbres en las mediciones y los resultados obtenidos con modelos de simulación, y desarrollo de metodologías comparables entre los diferentes estudios. ¿Con que grado de confianza podemos establecer pronósticos de eventos climáticos relacionados con el ciclo del carbono?.

TEMA 3. IMPLEMENTACION DEL PLAN CIENTÍFICO DEL PMC

El territorio nacional que establece el ámbito de incidencia del PMC tiene dos componentes principales: los ambientes marinos y los ambientes terrestres. Sobre estos dos ejes principales se llevará a cabo la implementación del Plan Científico del PMC. Los componentes de Dimensión Humana y Atmosférico corren transversalmente sobre estos ejes.

3.1. Ambientes Marinos

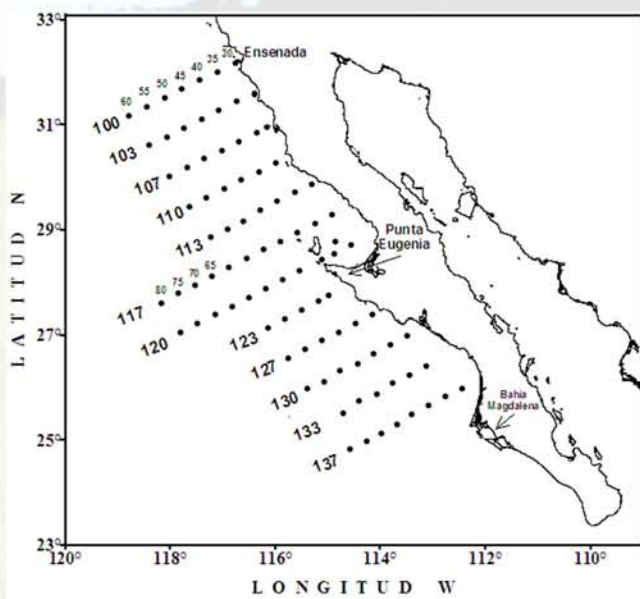
La absorción anual del CO₂ en la superficie de los océanos varía de entre 1-3 Gt carbón (1 Gigatonelada = 10¹⁵ g). Sin embargo, se desconoce cuanto de este cambio es debido a la variabilidad interanual del CO₂ atmosférico o cuales componentes son los más importantes. Los sistemas marinos comprenden una extensa área de nuestro territorio nacional, de ahí la importancia de estudiar el carbono y sus implicaciones con la variabilidad climática. En esta sección del Plan Científico del PMC se plantean algunas acciones prioritarias para estudiar las regiones y procesos más importantes, como son las zonas costeras, los márgenes continentales y los extensos mares mexicanos. Las acciones están enmarcadas dentro de cuatro temas relevantes para entender el rol del carbono en ambientes marinos.

3.1.1. Variabilidad espacio-temporal de carbono inorgánico en mares y costas.

Son cuatro los parámetros que describen el sistema del CO₂ y estos son: pH, alcalinidad total, CO₂ total y la presión parcial de CO₂. Sin embargo, con la medición de sólo dos parámetros y las mediciones de temperatura y salinidad es posible realizar la descripción del sistema del CO₂.

Las líneas de Investigación a Desarrollar en esta sección son:

- Determinar la variación espacial y temporal de los parámetros del sistema del CO₂ en costas y mares de México.



Mapa de localización de las estaciones de muestreo del programa IMECOCAL frente a Baja California, donde se colectan datos del sistema del CO₂ total, pCO₂ del agua y del aire durante las trayectorias de las cuatro campañas oceanográficas realizadas por año. En estas campañas se realizan experimentos para determinar la tasa de fijación del carbono por el fitoplancton marino. Se muestran los dos sitios donde se posicionaron boyas oceanográficas con sensores para medir pCO₂ del agua y del aire en forma continua (una frente a Ensenada B.C. y la otra frente a Bahía Magdalena, B.C.S.).



Fotografía de boya oceanográfica con sensores para medir pCO₂ del atmósfera adyacente y de la superficie del mar. Se muestra la antena a partir de la cual los datos son enviados vía satélite hacia los laboratorios de los participantes en los proyectos de investigación científica.

- Estimación de la variabilidad espacio-temporal de los flujos de CO₂ en la interfase océano-atmósfera.
- Medir los cambios a gran escala en el océano debidos a las emisiones de CO₂ antropogénicas a la atmósfera
- Generar algoritmos para estimar la pCO₂ (Presión parcial del CO₂), a partir de imágenes de satélite, mediante mediciones superficiales continuas de pH, de la salinidad y alcalinidad específica.

Las acciones recomendadas son la instalación de boyas instrumentadas en el Golfo de México, Golfo de California y costas del Pacífico Mexicano. Realizar programas integrales de investigación como el FLUCAR (Fuentes y Sumideros de carbono en los márgenes continentales del Pacífico Mexicano en regiones de las costas del Golfo de México, Golfo de California y región de Tehuantepec). Así como la instalación de paquetes de sensores de flujo continuo en barcos de oportunidad que permitan generar mapas de las variables del carbono con valiosa información espacial y temporal.

3.1.2. Transferencia de carbono por procesos biológicos.

El paso del carbono desde la forma inorgánica a la forma orgánica es debido principalmente al proceso fotosintético. Los procesos biológicos son los responsables de transferir y modificar los compuestos orgánicos del carbono, ya sea hacia niveles tróficos superiores o hacia fuera de las capas superficiales del océano. Las formas y concentraciones en las que se encuentra la materia orgánica disuelta en los sistemas acuáticos es una de las principales interrogantes en este campo de la ciencia. Esta forma de carbono representa además una de las fuentes principales de energía para el crecimiento de organismos unicelulares.

Las líneas de Investigación a Desarrollar son las siguientes:

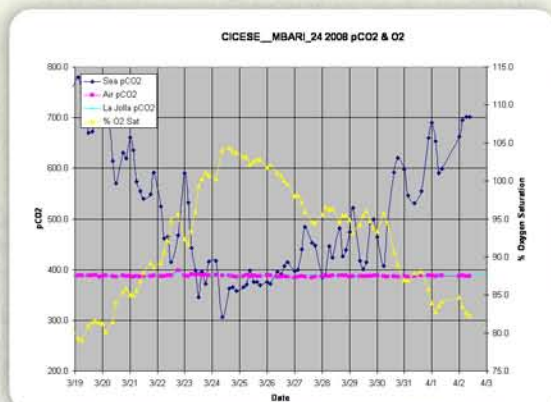
- El papel de bacterias y virus en la incorporación, transformación y transferencia del carbono orgánico disuelto.



Fotografías del B/O Francisco de Ulloa del CICESE utilizado en la recolección de información oceanográfica continua del sistema del CO₂ del océano.



Preparación y lanzamiento de la boya oceanográfica a bordo del B/O Francisco de Ulloa del CICESE, frente a las costas de Bahía Magdalena, B.C.S.



Ejemplo de la información recibida vía satélite (y posteriormente por Internet) obtenida por lo sensores localizados en la boya oceanográfica frente a Bahía Magdalena, B.C.S. En color azul es el pCO₂ del mar. En amarillo es el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto en la superficie del mar. En púrpura es el pCO₂ de la atmósfera adyacente al océano. La línea en azul celeste marca el valor de referencia de pCO₂ medido en la estación de La Jolla, California, EUA.

- Cambios en las tasas de incorporación del carbono inorgánico por los productores primarios (picofitoplancton, nanofitoplancton y fitoplancton), relacionados con la variabilidad ambiental del océano a diferentes escalas espaciales y temporales.
- El rol del zooplancton y las larvas de peces en la incorporación de carbono particulado y su transferencia hacia diferentes ambientes (fondo oceánico, plataforma continental, cuerpos costeros, etc.).

Existen un par de programas de los mares mexicanos del Océano Pacífico donde se ha obtenido en forma semi-sistemática información estacional sobre las tasas de incorporación de carbono inorgánico por el fitoplancton marino. Sin embargo, se requiere implementar programas extensivos en otras regiones del país, principalmente en el Golfo de México y Mar Caribe, con el fin de tener al menos un conocimiento general de estos procesos.

Solamente en algunas regiones de los mares mexicanos se han hecho experimentos del pastoreo del fitoplancton por el zooplancton. En estas mismas zonas se han evaluado en forma puntual la transferencia de carbono orgánico particulado producido en la zona eufótica hacia mayores profundidades. Por lo anterior, se requiere realizar un gran esfuerzo en este sentido, con el fin de conocer el transporte de la materia orgánica hacia el fondo marino y su posible permanencia por largos períodos. Este podría ser uno de los pocos mecanismos que ayuden al secuestro del carbono atmosférico (CO₂), el cual no ha sido evaluado adecuadamente en los mares mexicanos.

3.1.3. Intercambio zona costera-océano.

Las bahías, los estuarios y las lagunas costeras son ecosistemas marinos altamente productivos, por lo que son muy importantes a nivel local y global, tanto desde el punto de vista ecológico como económico. La alta productividad de estos ecosistemas se ha relacionado tradicionalmente con los aportes desde el continente, vía los ríos, de los elementos nutrientes promotores de la producción primaria como el carbono y los nutrientes. En las costas mexicanas los estuarios "clásicos" (estuarios tipo valle de río inundado) son escasos y predominan las lagunas costeras. A pesar de la escasez de aportes continentales en algunas regiones como el NW del país, se puede generalizar que las lagunas costeras mexicanas presentan condiciones de riqueza en términos de producción primaria, producción secundaria y diversidad de especies, tan altas como las de estuarios muy productivos.

Las líneas de Investigación a Desarrollar que se propone son:

- Evaluación de la magnitud de los reservorios de carbono orgánico e inorgánico.
- Estudiar la fertilidad de zonas estuarinas y en regiones dominadas por manglares.
- Determinar los flujos de carbono a través de las bocas de lagunas costeras y la dispersión de dichas propiedades hacia el interior.
- Determinar las variaciones en las tasas de reciclamiento bacteriano del material orgánico en sedimentos y en la columna de agua.
- Establecer el papel de las bahías, marismas y manglares en los flujos de carbono como fuentes o sumideros.
- Marismas y manglares: papel como reservorios y fuentes de carbono orgánico.
- Evaluar el rol de los productores secundarios en el intercambio de carbono.

Los estudios en estas zonas dado su complejidad deberá estar conformando por equipos de investigación multidisciplinarios expertos en cada uno de los diferentes ambientes (marismas, macro-vegetación, manglares, estuarios, esteros, bahías, etc.). Se proponen realizar estudios en las zonas costeras y bahías más representativas de los diferentes ambientes y climas de México: en el Golfo de México se proponen las costas de Quintana Roo

Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. Mientras que en el Pacífico se proponen en las costas de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima y Oaxaca.

3.1.4. Flujos de carbono en márgenes continentales.

Los márgenes continentales de México son la interfase entre los ambientes terrestres y las aguas oceánicas. El ciclo del carbono en los márgenes continentales mundiales está pobremente estudiado y hasta ahora no ha sido objeto de programas multidisciplinarios de investigación. El resultado es que actualmente no se conoce si estas regiones son fuentes y/o sumideros netos de GEI.

Las principales líneas de investigación a desarrollar propuestas son:

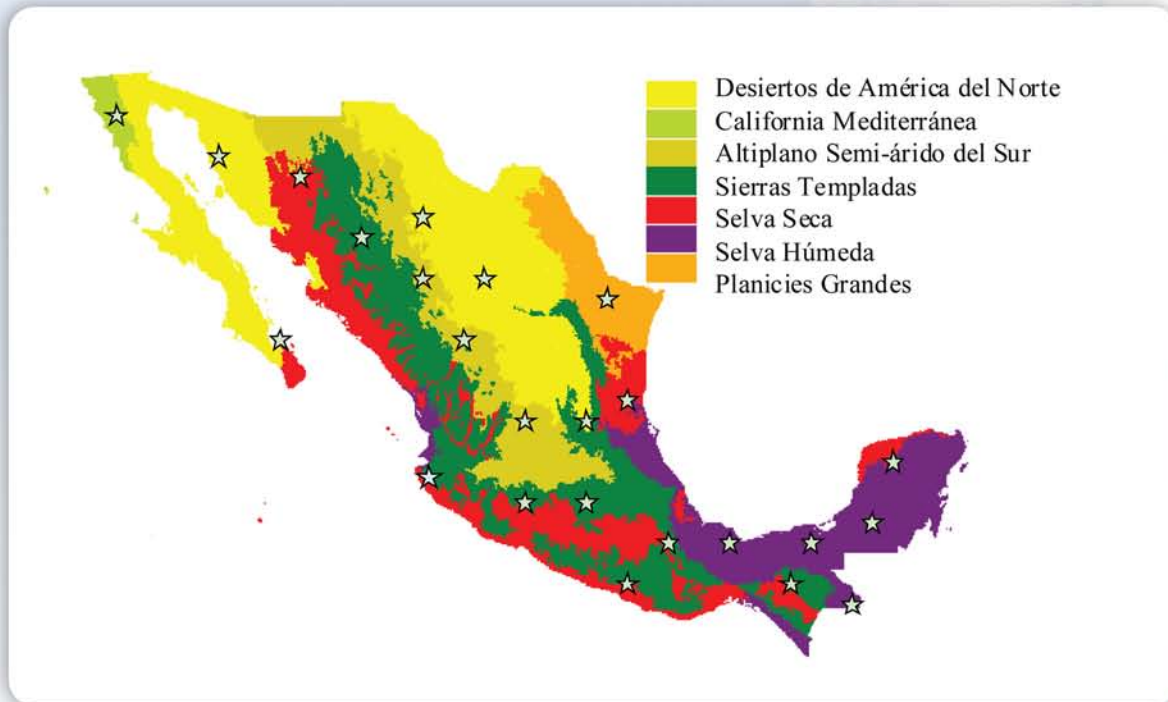
- Estimación de la variabilidad temporal del flujo de exportación (vertical) del carbono local en las aguas costeras.
- Comparar la variabilidad de las fuentes y/o sumideros en regiones ambientales representativas de las aguas costeras mexicanas.
- Avanzar el conocimiento de los principales procesos responsables de la variabilidad de los flujos de carbono (producción primaria, respiración, pastoreo, hundimiento-sedimentación, transferencia a través de la trama trófica, intercambio con la atmósfera, etc.).
- Entender el balance de carbono en las aguas costeras de los mares mexicanos.
- Evaluar la contribución de las actividades antropogénicas al reservorio de carbono de la zona costera.
- Generar modelos de predicción del potencial incremento de las fuentes y/o reducción de los sumideros de gases invernadero en las zonas costeras.

Las investigaciones en este tema se deben desarrollar en ambientes representativos de las costas de México, por ejemplo: el área de surgencias frente a Baja California, el Golfo de California, la región central del Pacífico Mexicano, el Golfo de Tehuantepec, la región norte y central del Golfo de México y el Mar Caribe. Para cubrir las diferentes escalas espacio-temporales se requiere la combinación de diferentes estrategias de muestreo: información generada por satélites, cruceros oceanográficos y boyas oceanográficas (series de tiempo). Paralelamente se llevarán a cabo los estudios socio-ambientales en los márgenes continentales. Esto incluye nuevos asentamientos y de desarrollo de actividades productivas turísticas, portuarias y productivas.

3.2. Ambientes Terrestres

Los ecosistemas terrestres participan activamente como almacenes y fuentes de carbono. Este papel hace que sean parte fundamental del ciclo global del carbono y parte fundamental de las acciones de mitigación del cambio climático. La forma en que estos ecosistemas terrestres sean manejados determina que éstos actúen como fuentes de emisión, estructuras de captura o reservorios permanentes de carbono (Dixon et al., 1993, 1994; Brown et al., 1996; IPCC, 2000).

Los cambios que ocurren en los almacenes y los flujos entre ellos requieren del diseño e implementación de un sistema de monitoreo nacional continuo que permita estimar la dinámica de GEI en ecosistemas terrestres. Esta es una condición insustituible para identificar y cuantificar las principales fuentes y sumideros de gases de invernadero del país, seleccionar las áreas con mayor potencial para la captura del carbono, así como las con mayor potencial de ser fuentes de GEI, para así establecer las medidas y políticas requeridas. Este sistema integrado de monitoreo debe estar dirigido a entender, monitorear y predecir flujos de carbono entre reservorios en los ecosistemas terrestres y la atmósfera y océano del territorio mexicano. Al mismo tiempo este sistema generará información básica para diseñar una política nacional de desarrollo enfocada a disminuir la contribución mexicana a las emisiones de GEI y para tomar medidas para la adaptación a los efectos de cambio climático y a las perturbaciones naturales y antropogénicas.



El plan científico propone por medio de proyectos integrar una red de colaboración, a los investigadores que actualmente están desarrollando investigación del ciclo de C en sistemas terrestres para formar y fortalecer grupos de investigadores en ecosistemas estratégicos, generar nuevos núcleos de investigadores en sitios importantes donde actualmente no hay investigación del ciclo de C, y promover la integración de los grupos que trabajan en los diferentes aspectos de análisis del ciclo del C. Con esta red también es posible tener agendas complementarias de investigación e integración de información con programas internacionales, de los cuales destacan el “Joint North-American Carbon Program” (<http://www.nacarbon.org/nacp>) y el “Global Carbon Project” (<http://www.globalcarbonproject.org>). Ver colaboración con proyectos internacionales, sección 4.0 de este documento.

3.2.1. Estrategia de Acción.

Generar una red que contenga 24 sitios de los paisajes representativos del país, en la cual se realizarán una serie de muestreos de flujos y reservorios que formarán la parte medular del diagnóstico. El conjunto de los paisajes representa el 1% del territorio nacional y sirve como base sólida para validar los modelos generados con el análisis de imágenes satelitales y para validar cada elemento del marco conceptual de los modelos de diagnóstico y de predicción), que se desarrollarán para estimar los flujos locales, regionales y nacionales. Posteriormente, los sitios continuarán como red de observatorios para el monitoreo continuo de ciclos de carbono en el futuro.

Por otra parte se establecerán experimentos estratégicos en los mismos sitios que deben responder las preguntas clave para entender los procesos ecológicos que definen la dinámica del carbono en los ecosistemas terrestres ante el cambio climático y las perturbaciones naturales y antropogénicas. Con el análisis de procesos y atribuciones se generarán modelos para producir mapas de flujos de carbono a muy alta resolución temporal y espacial. Estos modelos validados durante el diagnóstico y análisis de procesos a su vez forman la base para mejorar las predicciones de cambios futuros en el ciclo del carbono y serán validados y mejorados constantemente con los datos obtenidos con el monitoreo continuo, la experimentación y la información generada a partir del análisis y la integración de imágenes satelitales.

Finalmente toda la información y los resultados de los modelos proveen la información fundamental para la toma de decisiones en el ámbito de uso del suelo y de desarrollo de infraestructura terrestre. En el diseño del programa es fundamental el intercambio rápido y transparente de grandes cantidades de información de muchas disciplinas.

El diagnóstico incluye los siguientes elementos esenciales:

- Una red jerárquica de 24 sitios, representativos de los principales paisajes del país.
- Compilación y análisis de información satelital de varios sensores remotos y de video.
- Un sistema de mediciones de flujos de C entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera.
- Mediciones intensivas en el campo para evaluar los componentes principales de los modelos de análisis y predicción en dominios limitados de espacio-tiempo, en los cuales se miden todos los flujos importantes con técnicas múltiples.

Los experimentos estratégicos incluyen los siguientes elementos esenciales:

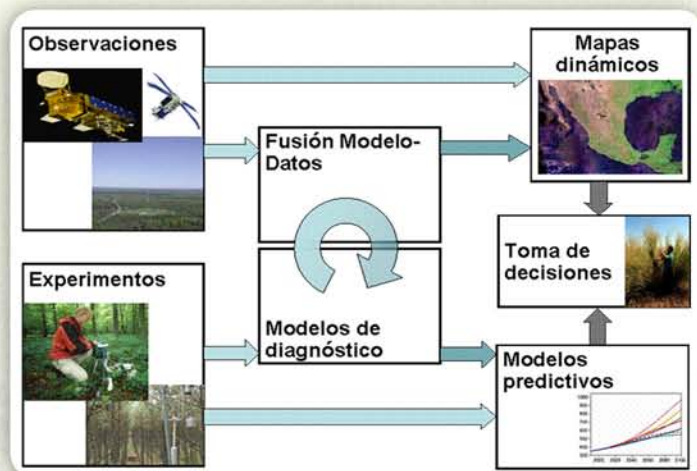
- Respuestas de ecosistemas terrestres a cambios atmosféricos (clima, CO₂, N).
- Respuestas de ecosistemas terrestres a regímenes de perturbación natural y antropogénica, manejo forestal y de suelo y uso de suelo.

La modelación incluye los siguientes elementos esenciales:

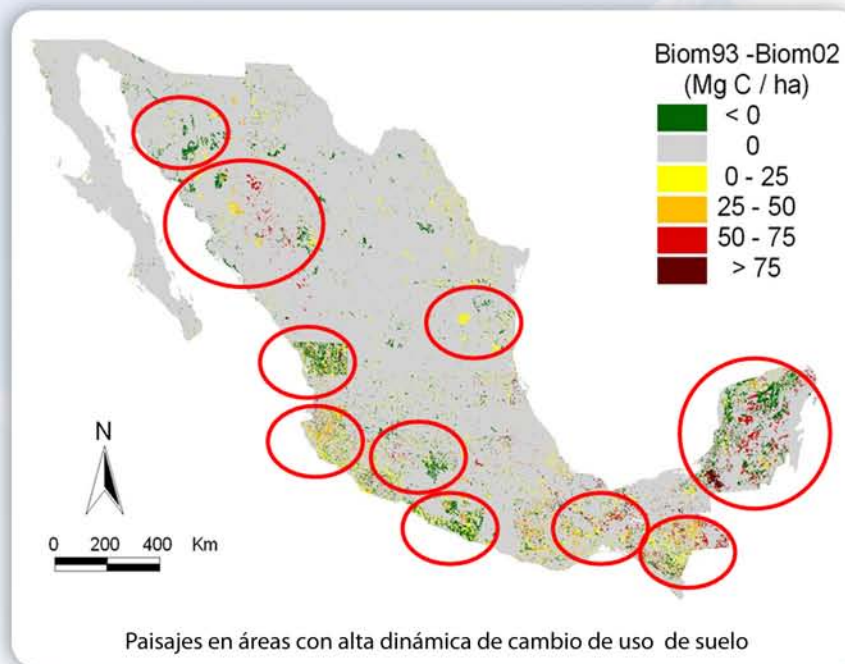
- Transferencia de información sintética de los estudios de procesos a modelos de diagnóstico y predictivo del ciclo de C.
- Análisis retrospectivo para validar la dinámica temporal y espacial de eventos de perturbación simulados por los modelos.
- Validación continua de los modelos con los datos obtenidos en la red de monitoreo.
- Desarrollo de escenarios de cambios futuros en las variables motores de los modelos.

La base científica para tomadores de decisiones incluye los siguientes elementos esenciales:

- Generación de opciones de manejo del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres con un mejor entendimiento y predicción de los efectos de las alternativas.
- Un sistema básico que calcula el balance de carbono anual en ecosistemas terrestres de México.
- Desarrollo de escenarios futuros de uso del suelo y sus impactos en los flujos y en la vulnerabilidad ambiental y social.



Torre de flujo de C en el CIBNOR



- Generación de propuestas de captura de carbono a partir de una evaluación científica del comportamiento de C presente y futuro.
- Generación de líneas de base eficientes para proyectos de mitigación de emisiones de carbono en el sector forestal y agrícola.

La selección de 24 paisajes que cubren aproximadamente el 1% del territorio nacional en las siete ecoregiones de México permitirá una fuerte integración de actividades de investigación intensiva, integración inteligente con las "imágenes virtuales" y síntesis de información existente. Será necesario diseñar un sistema de integración de información con bases científicas que incluya una comparación de bases de datos independientes, validación de modelos y de consulta continua con la sociedad. Los modelos podrán predecir cambios relevantes observables. Para ello se proponen dos métodos de integración de información:

1. La síntesis de datos de sitio y datos de sensores remotos con modelos que simulan flujos y cambios en las coberturas vegetales y reservorios de carbono.
2. La fusión de datos de todas las fuentes de información (terrestre, satelital, atmosférico, hidrológica, etc.) en modelos predictivos.

La síntesis de datos está enfocada a desarrollar mapas de vegetación y cambio de uso de suelo, manejo de la tierra, e historia de perturbaciones con una alta resolución temporal y espacial utilizando una combinación de datos satelitales, de muestreo estratificado en el campo y otras fuentes de información geográfica (poblados, infraestructura, suelos, topografía, etc.). Los datos se utilizarán para alimentar modelos de simulación de flujos de C y los resultados de los modelos se compararán en detalle con observaciones independientes de variables que representan la mayor incertidumbre en los modelos. Se generará un proceso de intercambio de información dirigida a mejorar la capacidad predictiva de los modelos. Las discrepancias entre las diferentes fuentes de información se utilizarán para identificar los parámetros con mayor incertidumbre en la estimación de flujos que al mismo tiempo sirven para ajustar los modelos. El producto final es un conjunto de estimaciones de flujos de C espacialmente y temporalmente consistentes con los datos disponibles y con el entendimiento de procesos que generan los flujos.

La generación de alternativas de uso del suelo, de escenarios futuros de cambios en el uso del suelo y los análisis de vulnerabilidad y de adaptabilidad social y ambiental se basan en una consulta continua con los usuarios y de estudios socio-ambientales con otros sectores involucrados. Se desarrollará mecanismos eficientes de divulgación de la información a la sociedad a través de los medios disponibles.

3.3. Integración

En estos proyectos está prevista la integración a futuro con los grupos de investigadores de sistemas oceánicos y terrestres en donde se analice la interacción y sus efectos en el ciclo del C. Para ello, las áreas temáticas de la Dimensión Humana y de la Atmósfera son por su naturaleza temas transversales. La investigación en torno a la dimensión humana busca entender por qué y cómo es que al transportarse, elaborar bienes y acondiciona sus casas, entre otras actividades productivas y cotidianas, la sociedad mexicana consume energéticos y genera cambios en el uso del suelo de incidencia en el ciclo de carbono, y por esta vía, en el calentamiento global. Esto permite saber cuales son las causas que hay que gestionar para disminuir o mitigar nuestras emisiones de gases de efecto invernadero. De igual importancia es conocer como los cambios en el ciclo de carbono y el calentamiento global inciden en la intensificación de inundaciones y sequías, en la escasez de agua, y en otras tantas consecuencias que afectan y vulneran las actividades productivas, infraestructuras y calidad de vida de la población. Este conocimiento permite a los tomadores de decisión saber qué acciones emprender para adaptarnos al cambio climático.

Destacan entre las principales líneas de investigación en el área de la dimensión humana:

- Estimación y medición de trayectorias de emisiones de carbono por los sectores energético, industrial, de transporte, residencial y primario a nivel local (regiones agrícolas, zonas industriales, ciudades).
- Medición y moderación del peso de factores sociales tales como tamaño y densidad poblacional, intensidad energética, "governanza", y PIB en las trayectorias de emisión de ciudades y otras zonas de interés .
- Evaluación de políticas de mitigación y adaptación. Preguntas clave incluyen a) cómo gestionan las autoridades en los tres niveles de gobierno las emisiones de GEI y la adaptación al cambio climático; b) son apropiadas estructuras de gobierno para mitigar las emisiones de GEI y gestionar el cambio climático; y c) qué tanto las políticas de mitigación y adaptación se ven facilitadas o restringidas por la capacidad institucional de las autoridades.

Existen ya dos iniciativas que están desarrollando estas líneas de investigación tanto dentro de México como a nivel mundial: URCM y RESUCCCITIES. URCM (Urban and Regional Carbon Management) es una iniciativa del Global Carbon Project que busca desarrollar investigación y apoyar la gestión del carbono y del desarrollo urbano sustentable. RESUCCCITIES (Initiative to Attain Resilient and Sustainable Relationships among Carbon, Climate and Cities) es una iniciativa dentro del National Center for Atmospheric Research que busca conjuntar expertos en carbono, cambio climático y desarrollo urbano para entender los factores sociales que inciden en las pautas urbanas de emisión de carbono; la vulnerabilidad urbana ante el calentamiento global, y la efectividad de las políticas urbanas de reducción de contaminantes y adaptación al calentamiento global.

Los ecosistemas acuáticos tienen una influencia vía la composición atmosférica, clima, estado del tiempo y los cambios asociados, los cuales son guiados por emisiones de gases de invernadero a nivel global y que generan cambios en la temperatura de la atmósfera, precipitación y vientos y consecuentemente modifican la temperatura superficial acuática (Mares y aguas epicontinentales), el nivel del mar y la estratificación de la columna de agua. Adicionalmente, el incremento en las concentraciones de CO₂ atmosférico y consecuente incorporación por los ecosistemas acuáticos conllevan a una reducción en el pH del agua. La acidificación a la vez genera cambios en la química y biología de los ecosistemas acuáticos de consecuencia par alas actividades económicas que de ellos dependen y de los servicios que proveen. Los riesgos y problemas inherentes a los ecosistemas acuáticos no pueden resolverse de manera aislada. Los aspectos de gobernanca son complejos y deben contemplar involucrar autoridades de los diferentes niveles incluyendo tratados con gobiernos.

Identificación de los componentes y desarrollo de un marco conceptual integrativo que tome en consideración las interacciones entre los sistemas acuáticos y su correspondiente terrestre y entre las personas locales, los ecosistemas y los mercados locales e internacionales.

Generar información para comprender la curva de respuesta entre la toma de decisiones (p.e. diferentes tipos de cambios de uso de tierra o diferentes sistemas que regulan la pesca) y procesos en los ecosistemas.

Desarrollar mecanismos para un manejo transfronterizo en todas las escalas considerando que los conductores de cambio se localizan comúnmente fuera de los límites geográficos en los ecosistemas acuáticos (clima, contaminantes transportados por corrientes, lluvia o viento) y que muchos cuerpos de agua o litorales son compartidos por más de un municipio, estado, etc.

Desarrollar modelos que contemplen las preguntas científicas de las fronteras ecológicas y la evaluación de las opciones de manejo, tomando en cuenta la complejidad tanto ecológica e institucional inherente.

Integrar las diferentes unidades y dimensiones espaciales y temporales en modelos físico-químico-biológicos con los socio-económicos para diferentes elecciones de individuos y comunidades como los modelos basados en agentes aplicables a las diferentes condiciones de los ecosistemas acuáticos incluyendo alcances Langrangianos.

Tema 4. COLABORACIÓN CON PROGRAMAS INTERNACIONALES

4.1. JNACP: Programa Conjunto Norte Americano del Carbono

El PMC desde el año 2006 ha venido interactuando como contraparte de los programas similares de Estados Unidos y Canadá. El objetivo es conformar al "Programa Conjunto Norte Americano del Carbono (JNACP por sus siglas en inglés)" de Estados Unidos, Canadá y México. Las principales preguntas de este programa son:

- ¿Cómo es el balance del C en Norteamérica (incluyendo los mares patrimoniales)? (Diagnóstico).
- ¿Cuáles son los factores que controlan las fuentes y almacenes del C y cómo cambian en el tiempo? (Procesos y Atribuciones).
- ¿Existen sorpresas potenciales? (Predicción).
- ¿Cómo se puede promover y manejar la captura del C y dar las bases para decisiones políticas (Bases Científicas para Políticas Ambientales).

La estrategia para implementar este Programa es por medio de proyectos que ayuden a integrar la síntesis continental del ciclo del C. Para ello se han propuesto tres tipos de proyectos:

Tipo 1. Se refiere a proyectos de investigación que se encuentran en operación y que pueden ser de interés a los tres países. Estos proyectos favorecerán el acceso e intercambio de información generado por los proyectos específicos de cada uno de los países. Un ejemplo de este tipo de proyectos es la realización de cruceros de investigación para el estudio de la dinámica del C oceánico en el Pacífico, desde Alaska hasta Baja California, México en el cual participan investigadores de los tres países.

Tipo 2. Se refiere a proyectos de investigación que se están llevando a cabo en alguno de los tres países y que es de interés común. Estos proyectos requieren de planeación adicional, un incremento en su infraestructura y financiamiento. Incluye tanto la generación de información nueva, así como del análisis de datos existentes. Ejemplos de este tipo de proyectos donde participa México son el estudio de los flujos del C entre el continente y el mar que se estará desarrollando en la Península de Baja California, México y el proyecto que estudia los flujos del Carbono a lo largo de la corriente de California (FLUCAR-IMECOCAL).

Tipo 3. Proyectos nuevos de colaboración, que requieren de ser aprobados por los administradores nacionales y de asignación de nuevos recursos financieros. En este grupo de proyectos se ha identificado como tema prioritario cuantificar del balance del C en el Golfo de México.

4.2. Colaboración con otros Programas.

El PMC está interesado de tener colaboraciones con otros programas. Para ello ha establecido comunicación con el Proyecto Global de Carbono (GCP, por sus siglas en inglés; http://www.globalcarbonproject.org/about_gcp.htm), que es un esfuerzo entre varios programas internacionales, entre ellos el "Programa Internacional de la Dimensión Humana (IHDP, por sus siglas en inglés) y el Programa Internacional Geósfera-Biosfera (IGBP, por sus siglas en inglés).

En el contexto nacional, el PMC esta estableciendo una estrategia de colaboración con la red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER; www.mexlter.org.mx).

Bibliografía Citada.

- Brown, S., J. Sathaje, M. Connell, and P. Kauppi, 1996: Management of Forests for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions. In (eds) Watson, R. T. et al, Climate Change 1995 - Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analyses, IPCC, Cambridge Univ. Press
- De Jong B., Soto L., Montoya G., Nelson K., Taylor J. Tipper R. 1997. Forestry and agroforestry alternatives for carbon mitigation: an analysis from Chiapas, Mexico. En: Adger W., Pettenella D., Whitby M.C., (eds) Climate Change Mitigation and European Land Use Policies. CAB International. Wallingford, UK pp. 263-284
- Dixon, R. K., J. K. Winjum, and P.E. Schroeder, 1993: Conservation and sequestration of carbon: the potential of forest and agroforest management practices, *Global Environment Change*, 2, 159-173.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler, and J. Wisniewski, 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190.
- Eswaran, H., E. van den Berg, P. Reich, , and J. Kimble, 2003. Global Soil Carbon Resources, pp.27-43. In: R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. A. Stewart (eds.), *Soils and Global Change*, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Henderson, G. S. 1995. Soil organic matter: a link between forest management and productivity. I: Carbon form and functions in forest soils, pp. 419 - 435.. (eds.) J.M. Bigham & J.M. Bartels. Soil Science Society of America Inc, Madison, WWI.
- Instituto Nacional de Ecología, 2001. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, SEMARNAT, México, DF.
- Instituto Nacional de Ecología, 2005. Inventario Nacional de de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002, SEMARNAT, México, DF.
- IPCC. 2001. Third Assessment Report (TAR) "Climate Change 2000". (En http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/; consultado en abril 2007).
- Sabine, C.S., M. Heimann, P. Artaxo, D. C. E. Bakker, C.-T. A. Chen, C. B. Field, N. Gruber, C. LeQuéré, R. G. Prinn, J. E. Richey, P. Romero-Lankao, J. A. Sathaye and R. Valentini. 2004. Current status and past trends of the carbon cycle, pp. 17-44. In: C. B. Field and M. R. Raupach (Eds.) *The global carbon cycle*. Island Press, Washington, D. C.
- Sheinbaum, C. y O. Masera. 2000. Mitigating Carbon Emissions While Advancing National Development Priorities: The Case of Mexico. *Climate Change* 47:259-282.