



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

OBSERVATORIO MEXICANO DEL CLIMA Y LA COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA (OMECCA)

INFORME TÉCNICO FINAL

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, CDMX
Noviembre 2025

AEM
AGENCIA ESPACIAL
MEXICANA



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



CONANP
COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS
NATURALES PROTEGIDAS



Calakmul
RESERVA DE LA BIOSFERA

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SEMARNAT
SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Contenido

Presentación	3
1. Antecedentes	4
2. Objetivos logrados	6
3. Metas logradas	8
4. Participantes y contribuciones al proyecto	12
5. Metodologías	13
5.1. Determinación de la densidad de columnas atmosféricas.....	13
5.2. Contaminantes y gases de efecto invernadero en superficie.....	16
5.3. Depósito atmosférico.....	18
5.4. Meteorología.....	19
5.5. Reservorios y flujos de carbono en suelo.....	20
6. Resultados	21
6.1. Meteorología.....	21
6.2. Calidad del aire.....	23
6.3. Gases de efecto invernadero.....	25
6.4. Percepción remota.....	28
6.4.1. Observaciones de la superficie.....	28
6.4.2. Observaciones satelitales.....	28
6.5. Respiración del suelo.....	32
7. Difusión	33
7.1. Eventos con la sociedad.....	33
7.2. Eventos académicos.....	34
7.3. Notas periodísticas y divulgación.....	35
8. Entregables	35
8.1. Informes.....	35
8.2. Bases de datos y página Web.....	36
9. Estrategia de monitoreo 2025-2027	37
10. Conclusiones	41
11. Referencias	43

PRESENTACIÓN

La realización de este proyecto y la elaboración del informe es resultado de una colaboración conformada por un grupo multidisciplinario de personas e instituciones liderado por el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. El financiamiento provino principalmente de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), aunque ha habido apoyos en especie de otros actores como ha sido la Reserva del la Biosfera de Calakmul (RBC-CONAGUA), la UNAM, UACAM y ECOSUR. El objetivo inicial fue el establecimiento de una infraestructura de observaciones en superficie con tecnología de punta para la generación de información de calidad sobre factores que influyen en el ciclo de carbono de la región. El sitio escogido para el estudio es de suma relevancia ya que se encuentra ubicado en el seno del segundo bosque tropical más grande del continente americano. Los datos generados buscan vincular la información obtenida en superficie con las observaciones satelitales disponibles en la actualidad para reducir las incertidumbres en el conocimiento del intercambio de carbono entre el suelo, la vegetación y la atmósfera.

Con este fin se adquirieron equipos y periféricos en el estado del arte para la medición de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos tanto basados en percepción remota como analizadores *in situ*, de depósito húmedo atmosférico y una estación meteorológica. Un contenedor marítimo fue adecuado como laboratorio móvil y trasladado al sitio final en Zoh Laguna Campeche, donde se encuentra operando exitosamente, aunque con algunas intermitencias, desde noviembre del 2023. En este informe se reportan las actividades del proyecto, los resultados de dos años de mediciones y finalmente las perspectivas para su continuidad y la ampliación de sus alcances en el corto y mediano plazo.

1. Antecedentes

Los bosques tropicales juegan un papel muy importante en la regulación del carbono a nivel global por lo que es importante estudiarlos y conservarlos. Las consecuencias del cambio climático se manifiestan con un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos como ondas cálidas, inundaciones, sequías, ciclones tropicales e incendios forestales entre otros. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático, estima en su último reporte que la temperatura media global se incrementó alrededor de 1.09 °C entre 1850-1900 y 2011-2020, con aumentos aún mayores sobre los continentes (1.59 °C) que sobre los océanos (IPCC, 2023). Los registros observacionales, la comprensión teórica de la termodinámica atmosférica y el uso de modelos computacionales han permitido identificar a la actividad humana como causa inequívoca del aumento reciente en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y del incremento observado en la temperatura global.

En 2019, aproximadamente el 22% de las emisiones netas globales de GEI provinieron de la agricultura y la silvicultura, la mitad de las cuales se debieron a la deforestación. Por esta razón, las medidas de mitigación no solo deben estar enfocadas en la reducción de las emisiones por la quema de combustibles fósiles, sino también hacia la conservación de los ecosistemas existentes que ayudan a capturar el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. En particular, las selvas tropicales poseen un alto potencial de secuestro y almacenamiento de carbono (C), debido a su elevada biomasa y a que constituyen casi la mitad de la cobertura forestal global (Grainger, 2008). Al capturar C en la biomasa aérea y subterránea, así como en los suelos, las selvas tropicales absorben el 15% del C total emitido por fuentes antrópicas, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático global (Rahman et al, 2017).

Las selvas tropicales constituyen sistemas de gran interés en el estudio del papel de la vegetación y el suelo en los ciclos del C y el agua. Según el Inventario Nacional Forestal y de Suelos, estos sistemas representan el 30% del total de las selvas del territorio mexicano (SEMARNAT, 2022), e incluyen Áreas Naturales Protegidas como la Reserva de la Biosfera Calakmul (RBC). Este macizo forestal, en conjunto con las selvas adyacentes de Guatemala y Belice, forman una amplia región conocida como la Selva Maya, la segunda mayor extensión boscosa continua en el Neotrópico después del Amazonas. La RBC, con un total de 723 mil hectáreas, fue creada el 23 de mayo de 1989, desde el 2002 es reconocida como patrimonio cultural por la UNESCO, y fue inscrita desde 2014 como Bien Mixto en la Lista de Patrimonio Mundial por albergar el legado de la cultura maya en convivencia armónica con su entorno natural megadiverso. En el 2023, se firmó un decreto para aumentar la extensión del área natural protegida a 1.5 M de hectáreas a lo que se le conoce como el Gran Calakmul. En 2025 los gobiernos de México, Guatemala y Belice crearon el Corredor Biocultural de la Gran Selva Maya, que incluye 11 Áreas Protegidas en la región entre las que destaca la RBC. A pesar de que se han hecho diversos estudios sobre almacenes de nutrientes y del carbono, hasta ahora ningún estudio se ha centrado específicamente en esta zona ni ha integrado datos en superficie con imágenes satelitales para disminuir la incertidumbre de las estimaciones en el ciclo del carbono en la región.

La tecnología satelital ha avanzado rápidamente tanto en el desarrollo de instrumentación hiperespectral en sistemas para la observación de la tierra como en algoritmos avanzados para la elaboración de productos que revelan, por una parte parte, las emisiones de gases a la atmósfera por actividades humanas, pero también las propiedades sobre el estado y la salud de los ecosistemas.

La NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos) lanzó la misión "Orbiting Carbon Observatory" inicialmente con el lanzamiento el 2014 del satélite OCO-2 sobre una órbita sincrónica al Sol, y en 2019 se instaló un segundo instrumento (OCO-3) sobre la Estación Espacial Internacional. Su principal objetivo es medir la distribución espacial del dióxido de carbono (CO_2) en todo el planeta y estudiar su evolución en el tiempo. Las tecnologías empleadas en OCO están basadas, entre otros, en herencias de misiones anteriores como SCIAMACHY y GOSAT-1 y -2, que aún están en funcionamiento. Por otro lado, para la detección de compuestos contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el formaldehído (HCHO), hoy ya se cuenta con tecnologías muy avanzadas como el instrumento TROPOMI (activo desde 2017) o, más recientemente TEMPO, un satélite puesto en una órbita geo-estacionaria el 7 de abril del 2023 (Zoogman et al. 2017).

Contar con información confiable y completa sobre la evolución de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y los GEI en la República Mexicana, es de suma importancia para poder evaluar la efectividad de las políticas públicas en materia del combate a la contaminación atmosférica y el cambio climático. Sin embargo, existen diversas limitaciones para contar con la información adecuada. Las estaciones de monitoreo atmosférico en superficie son escasas, requieren de constante mantenimiento y por lo tanto son muy costosas. Por estas razones, el uso de productos satelitales está siendo utilizado cada vez con más frecuencia. Sin embargo, estos productos pueden tener incertidumbres muy grandes y la disponibilidad de la información está sujeta a factores que pueden reducir considerablemente la información. Esto se debe, por ejemplo, a la hora del paso del satélite sobre el punto de interés o a condiciones muy específicas como cielos despejados o la luz del día para poder hacer una medición. Además, cabe mencionar que estos sensores remotos pueden tener sensibilidad reducida a concentraciones cerca de la superficie, lo que a menudo implica que se requiera promediar en períodos de semanas o meses para reducir el ruido en la medición.

Los programas responsables del lanzamiento y operación de los instrumentos a bordo de plataformas satelitales, por las razones explicadas anteriormente, inevitablemente consideran la participación de redes de observación en superficie para la validación y mejoramiento de los productos que ofrecen a sus usuarios. Las misiones GOSAT y OCO, por ejemplo, se basan en los datos de la red internacional TCCON (Total Carbon Column Observing Network) que ofrece datos de columna en la vertical de CO_2 , CH_4 y CO con una muy alta precisión. Otra fuente ampliamente usada para la validación de otras especies, como el NO_2 , HCHO y O_3 , es la red PGN (Pandonia Global Network). Estas dos redes de observación están coordinadas internacionalmente para proporcionar información de alta calidad de la composición de la atmósfera en sus sitios certificados, a través de mediciones de estas especies en toda la columna vertical atmosférica, que es equivalente al parámetro medido desde el espacio.

2. Objetivos logrados

A través de este proyecto, se lograron tres objetivos que pueden ser separados en los siguientes puntos generales:

- 1) Establecimiento de una infraestructura de observaciones en superficie con tecnología de punta**
- 2) Generación de información de calidad**
- 3) Vinculación con instituciones académicas, gubernamentales y con la sociedad**

El primer punto se refiere a la puesta en marcha del Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica (OMECCA), que se muestra en la Figura 2.1. Información relacionada al diseño, proceso de adecuación y características del contenedor marítimo para transformarlo en un laboratorio móvil, así como su traslado desde la Ciudad Universitaria de la UNAM en la Ciudad de México hasta Campeche, su instalación y puesta en operación se puede consultar en los informes parciales (Anexos No. 1-10) que se elaboraron durante la ejecución del proyecto.



Figura 2.1 Fotografía del Observatorio Atmosférico Calakmul, instalado en la inmediaciones de la Reserva de la Biosfera de Calakmul en Zoh Laguna, Campeche. Consta de un contenedor marítimo adecuado como laboratorio móvil para la medición de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero.

En términos generales, el Observatorio aloja instrumentación separada en los siguientes componentes:

- A. Equipos de **percepción remota** para medir rutinariamente la concentración integrada en la columna atmosférica de los siguientes compuestos: CO₂, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), vapor de agua (H₂O), dióxido de nitrógeno (NO₂), formaldehído (HCHO), ozono (O₃), y ocasionalmente, cuando se cuenta con nitrógeno líquido para el enfriamiento de un detector adicional, otros compuestos resultado de la combustión de biomasa como el ácido cianhídrico (HCN), acetileno (C₂H₂), etano (C₂H₆), metanol (CH₃OH) y ácido fórmico (HCOOH), entre otros. Las dos técnicas empleadas están basadas en la medición espectral de la radiación solar absorbida por los compuestos atmosféricos, a lo largo de su trayecto hacia la superficie.
- B. **Analizadores in situ** para el registro continuo de concentraciones de los siguientes gases y partículas finas a nivel de superficie (21 m sobre el nivel del suelo): CO₂, CO, CH₄, H₂O y material particulado fino PM_{2.5}) y grueso (PM₁₀).
- C. Colector de **depósito húmedo atmosférico** para la cuantificación y determinación de la composición química de la precipitación pluvial.
- D. **Estación meteorológica** para el registro continuo de parámetros de viento (intensidad y dirección), radiación, temperatura, humedad, presión y lluvia.

El segundo objetivo se cumplió a cabalidad a través de diferentes estrategias y acciones permitieron cumplir con estándares internacionales de calidad. Las mediciones de percepción remota son sometidas a procedimientos de control de calidad en la recuperación de las columnas reportadas y filtradas en caso de no cumplir con los criterios. En el caso del analizador de GEI, se instaló un sistema dinámico de calibración basado en cilindros de gases estándar generados por la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) de los EUA, la cual controla la trazabilidad del CO₂ y CH₄ a nivel global.

En esta línea y siguiendo los objetivos planteados al inicio del proyecto, se está contribuyendo a tres redes de observación con los datos que se están generando con el Observatorio Atmosférico Calakmul:

- A. **RUOA**. La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos es una red administrada por el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, que en colaboración con varias instituciones nacionales mantiene un registro de parámetros meteorológicos y ambientales en varios sitios distribuidos en la República Mexicana (<https://ruoa.unam.mx/>).
- B. **TCCON**. Esta Red de Observación de la Columna de Carbono es una red mundial de instrumentos que miden la cantidad de CO₂, CO, CH₄, N₂O y otros gases traza en la atmósfera terrestre (<https://www.tccon.caltech.edu/>).

- C. **PGN**. La Red Global Pandonia es una iniciativa respaldada por la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) para el procesamiento centralizado de mediciones realizadas con fotorradiómetros espectrales fabricados por la misma empresa, enfocada en la generación de información estandarizada de productos de validación satelital (<https://www.pandonia-global-network.org/>).

Cabe mencionar, que los datos se encuentran disponibles gratuitamente al público en general a través de estas tres redes así como en la página del proyecto (<http://www.epr.atmosfera.unam.mx/#Calakmul>).

En cuanto al punto 3, se debe mencionar que el proyecto se desarrolló con el apoyo económico y en colaboración con la Agencia Espacial Mexicana (**AEM**) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (**INECC**). También se forjó un vínculo estrecho con la Comisión Nacional de Áreas Nacionales Protegidas (**CONANP**), quienes alojan el Observatorio en las instalaciones de la RBC en Zoh Laguna, Campeche, y cuyas autoridades y personal han apoyado las actividades del proyecto y colaborado con la difusión de los datos generados por el mismo. También se establecieron vínculos académicos con la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM) y el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), con las cuales se desarrollaron algunas actividades de este proyecto. En particular con la UACAM, se firmó un convenio tripartita junto con la UNAM y la CONANP en el cual se delinearon los objetivos y lineamientos de la colaboración para el desarrollo de este proyecto. Consideramos que el enfoque multiinstitucional no solo enriqueció enormemente el alcance del proyecto, sino que se lograron realizar una gran variedad de actividades de difusión y divulgación con la participación de las instituciones locales. Algunas de éstas se resumen en el capítulo 7.

Durante los años 2024 y 2025 se adicionaron al proyecto dos ejes de estudio que no formaron parte originalmente del OMECCA, pero que contribuirán significativamente a reducir las incertidumbres existentes en los balances de carbono de la Península de Yucatán. Los monitoreos adicionales se centran en dos componentes principales del ciclo del carbono regional: el suelo y la vegetación, y se llevan a cabo en dos ecosistemas de selva situadas en sendos extremos del gradiente ecolimático de la Península.

3. Metas logradas

La descripción de las metas logradas sigue la siguiente cronología:

3.1. Adquisición de equipo y periféricos (Anexos 1 al 4)

En 2022 y 2023 se efectuó la compra de los siguientes equipos científicos:

1. **Espectrómetro Infrarrojo IFS 125HR**, fabricado por Bruker Optics, que incluye un rastreador solar para la conducción precisa de la radiación al interior del instrumento.

2. **Espectrofotómetro Pandora**, de SciGlobe Instruments and Services.
3. **Analizador de material particulado Teledyne T640**.
4. **Estación meteorológica**, que comprende un termohigrómetro Vaisala HMP155a, un piranómetro Kipp & Zonen SPLite2, un anemómetro RM Young 05106, un barómetro Vaisala PBT110, un pluviómetro Texas Electronics TE525mm y un registrador de datos Campbell CR1000X, además de periféricos como panel solar, controlador de carga y baterías para el suministro de energía y un gabinete de protección de la intemperie.
5. Equipo auxiliar para el monitoreo y mantenimiento de las condiciones de electricidad, temperatura y humedad relativa necesarias al interior del espacio donde se instalaron los equipos científicos, como un termohigrómetro Campbell CS215, un deshumidificador y un registrador de datos Campbell CR300.
6. **Equipo de cómputo y periféricos** para el control electrónico, almacenamiento y procesamiento de los datos adquiridos por los diversos instrumentos.
7. Adicionalmente se incorporó al observatorio un **espectrómetro de extinción anular en cavidad Picarro G2401** para la medición de gases de efecto invernadero en superficie. Para la calibración automatizada de la medición se instaló una **válvula múltiple Valco Vici EMTSD6MWE** de seis puertos y un conjunto de **tres cilindros de mezclas gaseosas** con una concentración conocida de los gases de efecto invernadero que se monitorean. Las mezclas fueron preparadas por el Global Monitoring Laboratory de la agencia estadounidense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), trazables a las escalas WMO X2019 para CO₂, WMO X2004 para CH₄ y WMO X2014A para CO.

3.2. Adecuación del contenedor (Anexos 5 al 7)

Durante 2023 se realizó la adecuación del contenedor marítimo de 20', el cual constituye la infraestructura principal del observatorio donde se alberga el instrumental científico y que permite la observación de la atmósfera. La empresa Creativos Espacios, Contenedores y Arquitectura llevó a cabo la adaptación, que incluyó la instalación eléctrica, la colocación de una unidad de aire acondicionado, el aislamiento térmico de paredes, techos y pisos, la colocación de recubrimientos y puerta de acceso hermética, entre otras especificaciones necesarias para la operación adecuada de los equipos (Fig. 3.1).

La observación de las columnas atmosféricas se efectúa a través de un domo motorizado retráctil, que se instaló en el techo del contenedor y cuya apertura y cierre puede ser controlada de manera remota. El contenedor también cuenta con otra apertura en el techo con puertos que permiten la toma de muestra de aire para la determinación de su composición con analizadores de GEI y material particulado.

Concluidos estos trabajos, el observatorio inició su operación satisfactoriamente.

La UNAM, a través de su **Gaceta (30 de noviembre de 2023) y el videoclip ‘Observatorio viajero’ creado y transmitido por UNAM Global TV**, difundió el proceso de traslado y puesta en marcha del observatorio. La difusión de estos materiales busca dar a conocer el fortalecimiento de la infraestructura nacional a través de esta iniciativa para la vigilancia y caracterización de los flujos de carbono y la importancia de los bosques tropicales en el ciclo de carbono y sus impactos en el clima.

3.4 Operación continua del observatorio

A partir de noviembre de 2023 y hasta la redacción de este informe, el OMECCA se encuentra funcionando de manera estable, con algunas intermitencias derivadas de interrupción de energía eléctrica y comunicaciones vía internet, así como averías del equipo que son inevitables en una operación de monitoreo continuo, controlada en su mayor parte de manera remota.

La metodología de medición en cada uno de los componentes del proyecto se detalla en el capítulo 5. Los resultados científicos del proyecto y los trabajos de difusión y socialización de los mismos se describen en los capítulos 6 y 7 respectivamente.

4. Participantes y contribuciones al proyecto

Actividades	Participante	Institución
Coordinación general del proyecto	Michel Grutter de la Mora	Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), UNAM
Vinculación y apoyo general en sitio	José A. Zúñiga, Edwin Hernández, Raúl Rincón y todo el personal de la RBC	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Reserva de la Biosfera Calakmul (RBC)
Diseño, desarrollo e instalación de infraestructura	Michel Grutter Wolfgang Stremme Omar López Antón	ICAYCC, UNAM
Instalación y operación de instrumentos de percepción remota	Michel Grutter, Wolfgang Stremme, Alejandro Bezanilla Adán Salazar	Agencia Espacial Mexicana
Instalación y operación de equipo meteorológico y de medición de gases y material particulado en superficie	Eugenia González del Castillo Michel Grutter, Omar López Antón y todo el personal de la RUOA	ICAYCC, UNAM
Automatización y control remoto de dispositivos	Abner García, Michel Grutter	
Análisis de datos	Michel Grutter, Eugenia González del Castillo Jonathan Malagón, Yael Hernández, Sandra Porras Mariajesús Bucio, Andrea Cadena, Luis Hernández Adán Salazar	Agencia Espacial Mexicana
Muestreo de depósito seco y húmedo, y análisis de las muestras	Javier Reyes Alberto Espinoza Rodolfo Sosa, Pablo Sánchez	Universidad Autónoma de Campeche ICAYCC, UNAM
Muestreo de flujos en suelo	Ma. De la Luz Espinoza, Eugenia González del Castillo Jorge Mendoza, Jesús Chi Quej, Víctor Ku Quej	ICAYCC, UNAM ECOSUR Unidad Campeche
Apoyo logístico y vinculación en sitios de Nuevo Béal, Calakmul	Juan Manuel Herrera José Antonio Álvaro Itzel Solís España y personal de Selvas de Calakmul	Sociedad de Servicio Técnico Forestal (SOSETEC) Selvas de Calakmul

5. Metodologías (Anexo 2)

5.1. Determinación de la densidad de columnas atmosféricas

a. CO₂, CH₄, CO y H₂O

La red TCCON (**Total Carbon Column Observing Network**) es una red global de instrumentos que miden el contenido total de bióxido de CO₂, CH₄, CO, N₂O y otros gases traza en la columna vertical de la atmósfera terrestre. La red inició operaciones en el año 2004 con la instalación del primer instrumento en Park Falls, Wisconsin (EUA) y actualmente operan 23 instrumentos en todo el mundo (Fig. 5.1). TCCON está diseñada para la investigación del flujo de carbono entre la atmósfera, el suelo y el océano a través de los ciclos que regulan tanto sus emisiones como los sumideros. Esto se logra a través de la determinación de la fracción molar de la masa total de estos gases en el aire y a través de los años ha contribuido de manera significativa al entendimiento que la comunidad científica tiene actualmente de los procesos que regulan el ciclo de carbono y la variabilidad de los gases de efecto invernadero.

Uno de los papeles más importantes de la red TCCON es proveer información independiente en apoyo y para la validación de varias misiones satelitales como son los programas de GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) y OCO (Orbiting Carbon Observatory). En un futuro cercano, esta importante red de instrumentos de superficie terrestre será la base para el programa de validación de la misión GeoCarb, que será la primera misión satelital dedicada al estudio del ciclo de carbono sobre una órbita geoestacionaria.



Figura 5.1. El mapa a la izquierda presentado en la reunión anual de TCCON celebrada en Junio del 2022, muestra las estaciones que han estado activas y contribuyendo a TCCON en los últimos años, así como aquellas que se encontraban en planeación en esa fecha, como es el caso de OMECCA, que se colocaría en algún punto de la Península de Yucatán.

Instrumentación: El instrumento principal de cada estación perteneciente a TCCON es un espectrómetro infrarrojo de alta resolución por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) de la marca Bruker modelo IFS 125HR (Fig. 5.2), cuyas especificaciones se detallan en el informe parcial 2. La metodología consiste en guiar la luz directa del sol hacia el espectrómetro haciendo uso de un rastreador solar y la óptica necesaria. El instrumento a través del principio de

interferometría captura el espectro del Sol que contiene la información detallada de todas las especies químicas que absorben en el rango del infrarrojo cercano. De esta forma, las intensidades detectadas de las bandas de absorción producidas por el CO_2 , CH_2 , CO , N_2O y otros gases traza son proporcionales a su abundancia y por consiguiente la concentración integrada en toda la atmósfera se puede determinar con una muy alta precisión y exactitud. La limitante más importante, sin embargo, es que con esta técnica sólo se puede medir de día y en condiciones de cielo despejado, que es cuando de cualquier forma los satélites también hacen sus observaciones más confiables.



Figura 5.2. Interferómetro Bruker IFS 125HR instalado en el contenedor para medir espectros solares de alta resolución en el rango IR cercano. A la derecha se visualiza el sistema óptico para el seguimiento autónomo del movimiento solar.

Análisis de datos: Para el análisis de espectros de absorción solar medidos por el IFS 125HR se utiliza un algoritmo de ajuste no lineal por mínimos cuadrados llamado GFIT. Éste contiene un sofisticado modelo directo, que simula un espectro atmosférico de transmitancia con datos prescritos de entrada, como son los perfiles de presión, temperatura y de la información *a priori* de los gases para la cual se usan los perfiles climatológicos de la localidad a partir de modelos globales. El otro componente de GFIT es el modelo inverso, que compara cada espectro medido con el calculado y determina cuál es la combinación de parámetros para obtener el mejor ajuste de la variable que se pretende recuperar.

Para los cálculos línea-a-línea, GFIT asume formas de la línea con perfiles tipo Voigt aunque también puede usar otras formas en casos de mezclado entre líneas y otros efectos espectroscópicos que pueden obstaculizar un buen ajuste. El código de recuperación reutiliza los coeficientes obtenidos en el mismo día para acelerar los cálculos y obtener mejores ajustes. Los Jacobianos se calculan analíticamente en paralelo con el análisis de espectros, los cuales se usan en los ajustes de los vectores de estado para también llegar más rápido a la solución y con mejores resultados. El código puede usarse en diferentes geometrías de observación y no sólo en la de absorción de radiación solar directa, y toma en cuenta la curvatura de la Tierra y su refractividad.

La nueva versión del modelo, GGG2020, usa 51 capas en la vertical y los intervalos van aumentando con la altura. Utiliza la presión atmosférica medida en la superficie para determinar el perfil en esa locación y una biblioteca con más de 15 mil líneas solares para simular el

espectro exo-atmosférico. GFIT para las estaciones TCCON, no recupera un perfil sino que asume un perfil conocido para cada gas y lo ajusta a la medición. Esto hace el cálculo mucho más rápido y evita algunos errores sistemáticos que los modelos que hacen recuperaciones de perfiles presentan en ocasiones. Este tipo de recuperación tipo escalamiento de perfiles es válido para gases cuya distribución vertical no cambia tanto como es el caso de CO_2 y el mismo oxígeno (O_2). En cuanto a la forma instrumental de la línea, GFIT hace una convolución numérica de una función SYNC, representando el decaimiento óptico finito, con una función RECT representando el campo óptico de visión finita del instrumento.

Las salidas de GFIT más relevantes son, naturalmente: 1) los factores de escalamiento para la obtención de las razones de mezclado por volumen (VMR) de cada gas de interés, y 2) la información sobre la incertidumbre del parámetro recuperado. Ésta se obtiene de los elementos diagonales de la matriz inversa de covarianza, que son multiplicados por los a priori de la columna vertical.

b. NO_2 , O_3 , HCHO y SO_2

La Red Global Pandonia (PGN). Como instrumentos para la medición de NO_2 , O_3 , HCHO y SO_2 en la columna vertical de la atmósfera, se utilizan los fotoradiómetros espectrales llamados PANDORA que se describen abajo. Éstos son considerados como instrumentos de referencia para una amplia variedad de usos incluyendo la validación de productos satelitales. La red PGN realiza la calibración de sus instrumentos y el procesamiento de los datos de manera centralizada, con el fin de homogeneizar el análisis y minimizar los posibles sesgos que pudieran surgir por tener diferencias en las configuraciones instrumentales, componentes ópticos, formatos y métodos para el análisis de datos.

La red PGN (Fig. 5.3) es una iniciativa con apoyo de la NASA y la ESA que tiene como objetivo apoyar los esfuerzos de validación de varias misiones satelitales enfocadas en estudios de la química y física de la tropósfera como es la calidad del aire, los aerosoles, las nubes, etc. Para ello se creó una empresa Luftblick OG en Austria, que además de coordinar las tareas de la red PGN y asegurar el buen funcionamiento de los instrumentos que pertenecen a ella, también desarrolla y mejora los algoritmos de análisis y pone los productos de todas las estaciones en un repositorio que pone a disposición de la comunidad y el público en general toda la información que se genera en la red.



Figura 5.3. Mapa de la red de PANDORAS mostrando la ubicación de 3 instrumentos instalados en el centro de México.

Instrumentación: El instrumento PANDORA (Fig. 5.4) es un fotorradiómetro espectral dotado de un espectrómetro miniaturizado tipo Czerny-Turner, que usa un detector CCD de 2048×64 pixeles (AvaSpec-ULS2048x64) y una malla holográfica de 1200 líneas/mm para medir espectros en el rango de 280 a 530 nm con una resolución espectral de aprox. 0.6 nm. El instrumento cuenta con un sistema de seguimiento solar basado en dos motores y una mira telescópica que dirige la radiación directa del Sol a una fibra óptica, que guía la luz solar hacia el espectrómetro. El cabezal del rastreador cuenta con dos ruedas giratorias, para escoger la combinación de filtros, tanto de densidad neutral, polarizadores o de interferencia, que se emplean durante una secuencia de medición. Para reportar los productos disponibles en la Red Global Pandonia (PGN, 2022), se realiza un procesamiento centralizado en el que se utilizan los espectros medidos y la



información específica de cada sistema para la calibración. Los productos de columna total de los gases recuperados corresponden al contenido de esa especie entre la superficie y el tope de la atmósfera. Actualmente existen algoritmos para recuperar NO_2 , HCHO y O_3 , entre otros parámetros. El instrumento tiene la capacidad de medir en modo MAX-DOAS para obtener información adicional en la vertical (Cede et al. 2019). Los productos de la red PGN están disponibles al público en general (PGN, 2022)

Figura 5.4. Fotorradiómetro Pandora instalado sobre el Observatorio Atmosférico Calakmul para medir columnas verticales de NO_2 , O_3 y HCHO .

5.2. Contaminantes y gases de efecto invernadero en superficie

a. Gases contaminantes y de efecto invernadero

Instrumentación: Para el monitoreo de la concentración a nivel de superficie de CO_2 , CH_4 y CO , su variabilidad diurna, estacional e interanual, se emplea un espectrómetro de extinción anular en cavidad (*Cavity Ring-Down Spectrometer*, CRDS por sus siglas en inglés) marca Picarro, modelo G2401, que permite monitorear la fracción molar de CO_2 , CH_4 y CO en aire atmosférico (Fig. 5.5). Se trata de un instrumento de última generación que mide con una precisión por debajo de 50 ppb para CO_2 , 1 ppb para CH_4 y 15 ppb para CO . La toma de aire atmosférico se ubica a 17 m de altura sobre una torre metálica arriestrada adyacente al contenedor, protegida con un guarda-lluvias de PVC; la muestra es conducida al CRDS utilizando tubo synflex 1300 (Eaton).

El CRDS se encuentra instalado dentro del contenedor de clima controlado. Su calibración se lleva a cabo de manera mensual haciendo pasar por el analizador tres mezclas gaseosas con concentraciones conocidas de los gases bajo consideración (Tabla 1) (Fig. 5.5). Los estándares gaseosos son preparados por el Global Monitoring Laboratory de la agencia estadounidense

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), trazables a las escalas WMO X2019 para CO₂, WMO X2004 para CH₄ y WMO X2014A para CO.



Fig. 5.5 Izquierda: Espectrómetro de extinción anular en cavidad (CRDS) marca Picarro, modelo G2401. Derecha: sistema de válvula y cilindros de calibración y seguimiento.

La operación del CRDS se complementa con el uso de un cilindro ‘blanco’ de mezcla gaseosa, también llamado ‘target’, que no participa de las calibraciones, es tratado rutinariamente como si no se conociese su concentración, y cuyo uso tiene por objeto la estimación de incertidumbre de las mediciones y el seguimiento del impacto de las variaciones en temperatura y presión en el monitoreo continuo (Tabla 1) (Yver-Kwok et al. 2021). Las mezclas de los cilindros *target* fueron preparadas en el Laboratoire des Sciences du Climat et de l’Environnement (LSCE) del instituto francés Pierre-Simon Laplace. Los ciclos de monitoreo atmosférico, mezcla ‘blanco’ y calibración se controlan automáticamente por medio de una válvula múltiple giratoria EMTSD6MWE (Vici Valco Instruments) de seis puertos.

Tabla 1. Ciclos de uso de las mezclas gaseosas de calibración y seguimiento para el funcionamiento del analizador CRDS de GEI Picarro G2401.

Cilindro	Composición	Uso	Frecuencia de inyección	No. ciclos de inyección
Cal_3	420 ppm CO ₂ 1960 ppb CH ₄ 150 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Cal_2	405 ppm CO ₂ 1890 ppb CH ₄ 125 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Cal_1	390 ppm CO ₂ 1820 ppb CH ₄ 100 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Blanco (target)	430 ppm CO ₂ 1900 ppb CH ₄ 100 ppb CO	Seguimiento	20 min c/20 h	1

Análisis de datos: El tratamiento de los datos sigue las especificaciones establecidas por la red europea ICOS (Integrated Carbon Observation System; Yver-Kwok et al. 2021), que asegura la comparabilidad de las mediciones entre estaciones de todo el mundo. Las series de tiempo de la concentración atmosférica de cada gas se utilizan para calcular ciclos diarios, estacionales y anuales, así como para obtener la tasa de crecimiento anual y la variabilidad interanual de la concentración de fondo de CO₂ y CH₄. Los datos crudos serán enviados diariamente a un servidor de almacenamiento ubicado en Ciudad Universitaria, en la CDMX. Las concentraciones atmosféricas corregidas, en promedios horarios y de cada minuto serán puestas a disposición del público a través de la página web de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, ruoa.unam.mx), a la cual pertenece el OMECCA.

b. Partículas atmosféricas

La medición de partículas finas es de gran relevancia para conocer el impacto de fuentes externas de contaminación, como son los incendios forestales, las quemas agrícolas o de residuos, la contaminación de vehículos automotores, de carga o industriales.

Por otra parte, la fracción PM_{2.5}, que comprende las partículas con un diámetro menor a 2.5 micrómetros, pueden ser transportadas distancias muy largas como es el caso del polvo del Sahara, que se sabe que en condiciones particulares puede llegar a las costas del Caribe en ciertas épocas del año.

Se instaló un analizador marca Teledyne modelo T640 de partículas finas y gruesas (PM₁₀ y PM_{2.5}) (Fig. 5.6), basado en la espectroscopía de banda ancha usando la dispersión a 90° de luz blanca con un LED policromático. Este instrumento, es capaz de medir concentraciones >0.1 µg/m³ cada minuto con una precisión de 0.5 µg/m³ y es considerado un método de referencia equivalente por la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (EPA).

Fig. 5.6. Monitor de material particulado Teledyne T640



5.3. Depósito atmosférico

El depósito atmosférico es la cantidad de cualquier compuesto suspendido en la atmósfera que se ha precipitado a la superficie de la tierra (expresado en kg/ha). Si desciende por acción del viento y la fuerza de gravedad, en ausencia de fase acuosa, se denomina depósito seco y si desciende por acción de algún tipo de precipitación meteorológica (lluvia, nieve, granizo, neblina) se denomina depósito húmedo (US-EPA, 2016). Los muestreos del depósito húmedo y seco proporcionan información valiosa sobre las condiciones ambientales del aire ambiente y por lo tanto del impacto que pudieran tener las emisiones de otras regiones.

Como parte del proyecto, se evalúa la composición química del depósito atmosférico húmedo en el sitio del OMECCA en Zoh Laguna, Campeche. Se instaló el equipo de colección automático de muestras separadas de depósito húmedo y seco en el techo del contenedor marítimo (Fig. 6.7). La colección de las muestras, su transporte y entrega final para análisis en los laboratorios en la Sección de Contaminación Ambiental del ICAyCC de la UNAM se lleva a cabo a través de una cadena de custodia, que forma parte del sistema de Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (AC/CC) de dicho laboratorio.



Fig. 6.7. Foto del muestreador de depósito instalado en el techo del contenedor del OMECCA.

5.4. Meteorología

El OMECCA cuenta con una estación meteorológica que forma parte de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA). Se registran cada minuto los promedios de temperatura y humedad relativa del aire, rapidez y dirección del viento, radiación solar incidente y presión barométrica, así como la precipitación acumulada. La tabla 2 resume los instrumentos utilizados con este fin y las variables que se registran. Los sensores se ubicaron sobre la torre metálica arriostrada anexa al contenedor, por encima de la estatura máxima del dosel vegetal.

Para el procesamiento y diseminación de la información meteorológica, el OMECCA sigue los procedimientos de control de calidad, mantenimiento periódico y calibración de la RUOA. Los datos se liberan con un nivel de calidad L1, es decir como archivos de texto mensuales con datos de frecuencia horaria y de minuto, donde los picos electrónicos y las mediciones físicamente imposibles se han eliminado y reemplazado con 'null'. Los archivos L1 se ponen a disposición de los usuarios a través de la página web de la red (<https://ruoa.unam.mx>).

Tabla 2. Equipo para observación meteorológica.

Sensor/Equipo	Marca y Modelo	Variable(s)
Termohigrómetro	Vaisala HMP155A	Temperatura y humedad relativa del aire
Piranómetro	Hukseflux SR20-T2	Radiación solar global incidente
Anemómetro	RM Young 05106	Rapidez y dirección horizontal del viento

Sensor/Equipo	Marca y Modelo	Variable(s)
Pluviómetro	Texas Elec. TE-525MM	Precipitación
Barómetro	Vaisala PTB 110	Presión barométrica
Termohigrómetro interior	Campbell Sci. CS215	Temperatura y humedad del aire al interior del contenedor
Registrador de datos	Campbell Sci. CR1000X	

5.5. Reservorios y flujos de carbono en suelo

Durante 2023 y 2024 se realizaron dos campañas de **medición prospectiva de la tasa de respiración del suelo en tres sitios o parcelas con diferente uso de suelo**. El primer sitio se ubicó en el interior de la RBC, en ecosistema de selva mediana subperennifolia; un segundo sitio se localizó en la zona de influencia de la Reserva, dentro del Ejido Nuevo Béal y en proximidad a la aguada Chumaquil, donde se realizó una comparación entre puntos de muestreo en zona de selva baja inundable (SBI) y no inundable (SBNI). Un tercer sitio, también dentro del Ejido Nuevo Béca se ubicó en una zona de manejo forestal, aquí específicamente se comparó la tasa de respiración entre puntos muestreados en el interior de un claro talado recientemente (ZC), y una zona adyacente a dicho claro (ZAC) que no había sido sometida a manejo.

En cada campaña se seleccionaron diez puntos en el interior de cada parcela para realizar el muestreo del CO₂ efluente utilizando una cámara estática de acumulación. La cámara consiste en un cilindro de PVC sellado en un extremo, que contiene un sensor de concentración de CO₂ en aire por difusión (Vaisala CARBOCAP GMP 343), así como sensores de temperatura y humedad relativa del aire al interior y exterior de la cámara (Campbell Sci., CS215). La cámara se sella contra la superficie del suelo y el CO₂ liberado por el mismo se acumula en el interior del cilindro debido a la actividad de las raíces vegetales, los microorganismos del suelo y la posible disolución de carbonato de calcio en el agua presente en el mismo. La tasa de respiración o flujo de CO₂ del suelo se estima a partir de la pendiente de dicha acumulación.

6. Resultados

6.1. Meteorología

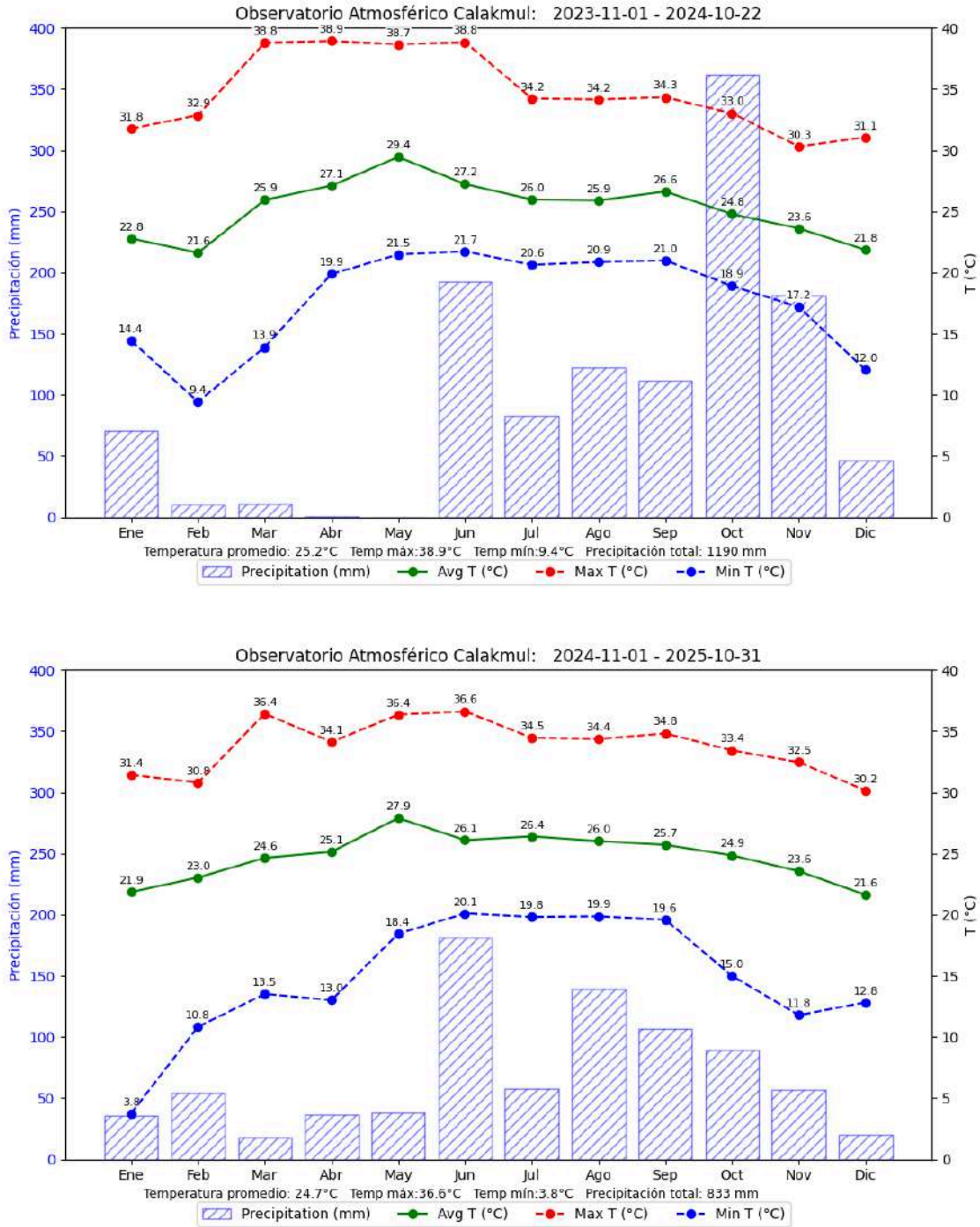


Figura 6.1 Climatograma con datos de la estación meteorológica para los años 2024 (arriba) y 2025 (abajo).

Como se mencionó anteriormente, la estación meteorológica cuenta con sensores colocados a 17 m sobre el nivel del suelo que registran cada minuto la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, la precipitación, así como la intensidad y dirección del viento. En la figura 6.1 se muestran los promedios mensuales de estos parámetros a lo largo del 2024 (arriba) y el 2025 (abajo). Los datos fueron filtrados para eliminar valores erróneos que presentaron ruido en las mediciones, con los mismos procedimientos que se realizan para otras estaciones de la RUOA.

De estas figuras podemos concluir que 2024 fue un año más caluroso, presentando una temperatura promedio en el mes de mayo de 29.4°C, mientras que en el 2025 el promedio para el mes más caluroso (igual mayo) fue de 27.9 °C. En los meses de marzo a junio del 2024 se presentaron temperaturas máximas de 38.7 - 38.9 °C mientras que el año siguiente éstas llegaron a 36.4°C.

Notorio fue que en 2025 llovió 30% menos que en 2024, ya que los registros entre noviembre y octubre sumaron 833 y 1,190 mm, respectivamente. En octubre del 2024 se registró una precipitación de 350 mm, la más alta en los dos años de registro.

La diferencia entre estos dos años también se reflejó en los vientos. Las rosas de vientos para cada año en la figura 6.2 muestran un patrón diferente, ya que en el 2024 la componente predominante de dirección de viento fue del E-SE, mientras que en el 2025 fue de E-NE. Muy probablemente estos cambios se dieron debido a que las condiciones de La Niña que prevalecieron a lo largo del 2024, se terminaron alrededor de marzo/abril, dando paso a una fase de ENSO-neutral durante la mayor parte del verano y otoño del 2025.

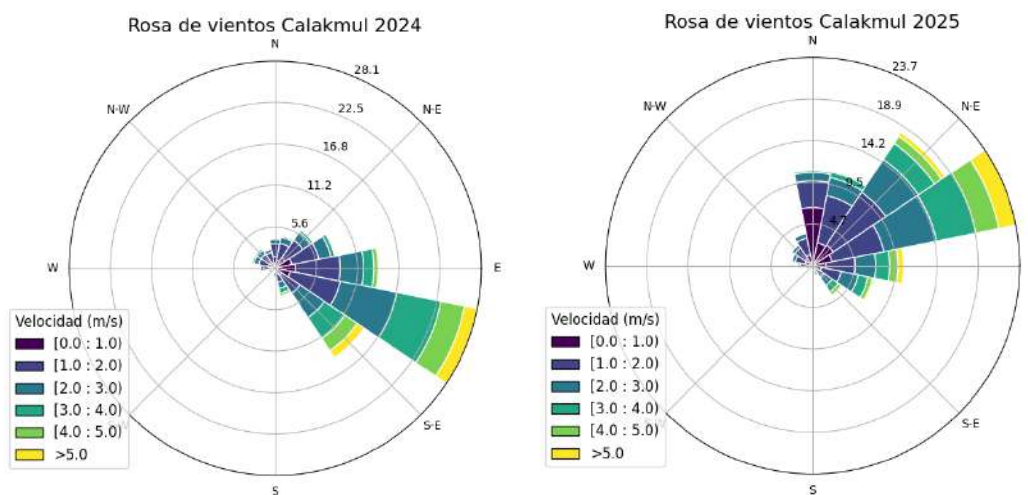


Figura 6.2. Rosa de vientos para el año 2024 (izq) y para el 2025 (der) obtenidas en el OMECCA.

6.2. Calidad del aire

Los niveles de contaminación del aire se pudieron determinar en el entorno del Observatorio Atmosférico, característicos del poblado de Zoh Laguna, Campeche, a través de las mediciones de las concentraciones de partículas finas suspendidas en el aire PM10 (tamaños aerodinámicos menores a 10 μm) y PM2.5 (< 2.5 μm). En la figura 6.3 podemos apreciar que los niveles más altos de partículas en 2024, tanto PM10 como PM2.5, se dieron en los meses de febrero hasta principios de junio. A partir de esa fecha empezaron las precipitaciones y los niveles de partículas se redujeron significativamente. En el caso de PM10, se registraron concentraciones horarias por encima de las 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en varias ocasiones, lo cual representa niveles de contaminación muy altos. Las PM2.5, que son inclusive más dañinas para la salud humana, también superaron con frecuencia valores de >200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La presencia de estos contaminantes regularmente están asociados a quemas domésticas, agrícolas, incendios forestales o la resuspensión de polvos. En condiciones de secas o ausencia de lluvias, éstas fuentes se acentúan y como puede verse en la figura 6.1, durante los meses de febrero a mayo prácticamente no llovió.

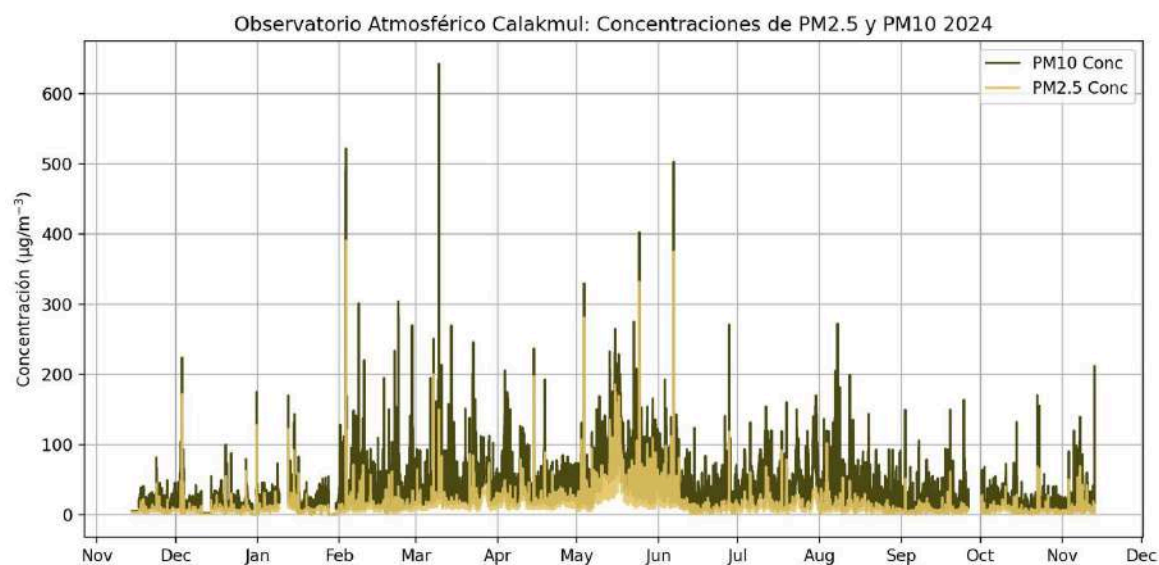


Figura 6.3. Concentración de material particulado PM10 y PM2.5 suspendido en el aire medido en el Observatorio Atmosférico Calakmul durante el 2024.

Al comparar este periodo (febrero a mayo) del 2025 en la figura 6.4, se puede apreciar que los promedios mensuales de ambos contaminantes fueron significativamente menores a las del año anterior. Las altas temperaturas del 2024 y la escasez de lluvia durante este periodo tuvieron un efecto en la concentración de partículas, aunque probablemente influyeron otros factores como la presencia de vehículos pesados debido a las obras que tuvieron mayor actividad durante el 2024.

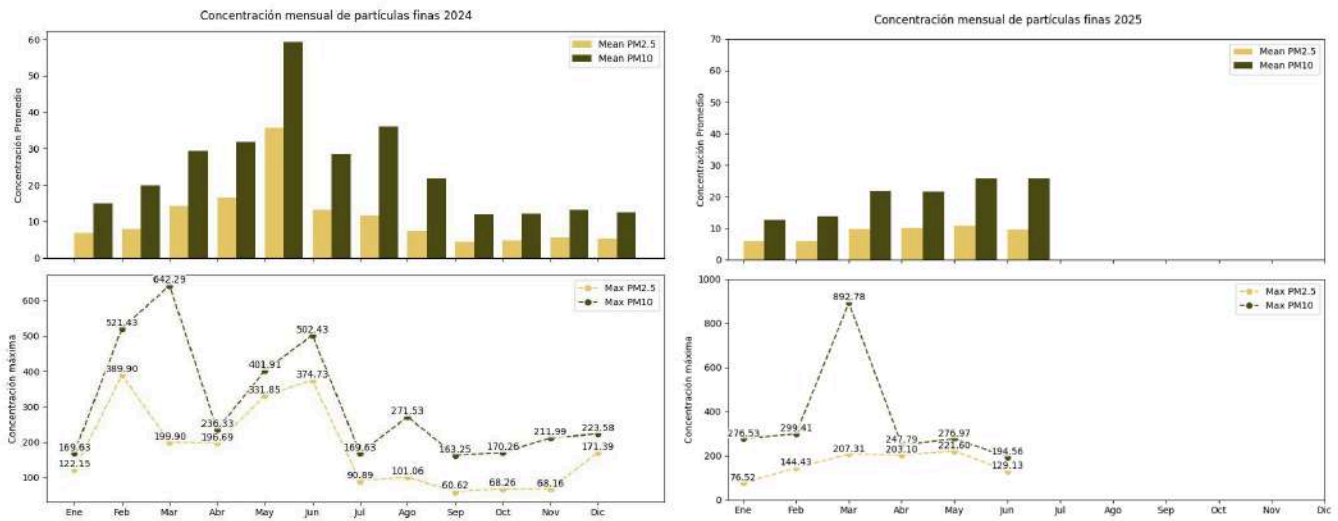


Figura 6.4 Promedios mensuales de PM10 y PM2.5 (arriba) y valores máximos medidos (abajo) para el periodo de enero 2024 hasta junio 2025 en el Observatorio Atmosférico Calakmul.

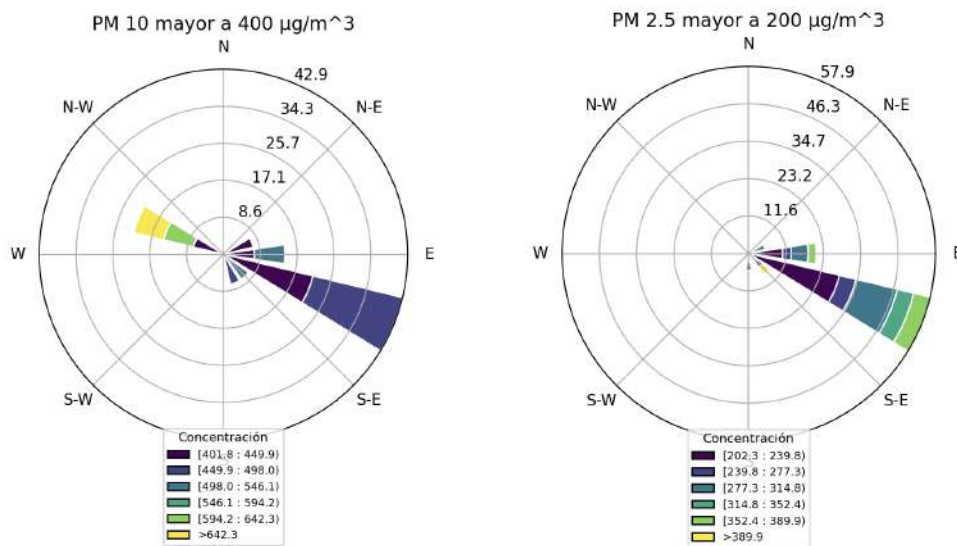


Figura 6.5. Rosas de concentraciones de PM10 (izq.) y PM2.5 (derecha) mostrando la procedencia de los valores más altos medidos (verdes y amarillos) en función de la dirección del viento.

Los paneles inferiores de la figura 6.4, también muestran los valores máximos registrados en cada mes de registro, lo cual sorprendentemente presentan valores sumamente altos. El registro más alto se dió en marzo del 2025, que llegó a un nivel ligeramente por debajo de los 900 µg/m³. Las rosas de concentraciones presentadas en la figura 6.5 indican que las concentraciones mas altas (colores amarillos) de PM10, provinieron del O-NO. Esto sugiere que las partículas tienen un origen local muy probablemente de quemas domésticas del poblado de Zoh Laguna.

Por otro lado, las concentraciones más altas de las partículas aún más finas (PM2.5), provienen de E-SE, que es la dirección predominante a lo largo de este período (ver figura 6.2). Las partículas más pequeñas pueden viajar mayores distancias, por lo que muy probablemente se trata de emisiones provenientes de incendios en la región de Campeche o Quintana Roo.

6.3. Gases de efecto invernadero en superficie

La figura 6.6 muestra la serie temporal de la concentración (fracción molar) de CO₂ medido a nivel de superficie con el analizador CRDS. Los puntos representan promedios de cada minuto desde noviembre de 2023 y hasta principios de julio de 2025, cuando el instrumento sufrió un desperfecto. La variabilidad de la concentración de CO₂ en la atmósfera es mínima durante la época seca del año, particularmente de abril a mediados de junio, mientras que se incrementa considerablemente durante la época de lluvias. La figura muestra además la evolución horaria (promedio ± 1 DE) del ciclo diario de la concentración, así como la amplitud del ciclo por época del año. **La amplitud u oscilación diaria en 2024 fue en promedio 4.3 veces mayor durante el verano (junio-octubre) que durante el estío de primavera (abril a junio) del mismo año.** En los ciclos diarios también es posible observar que, si bien existe variación en la concentración diurna entre estaciones del año, las diferencias estacionales son particularmente marcadas durante la noche, cuando el CO₂ alcanza promedios horarios de 435 ppm (μmol mol⁻¹) en la época de secas, y se eleva a 455 ppm en promedio durante las lluvias.

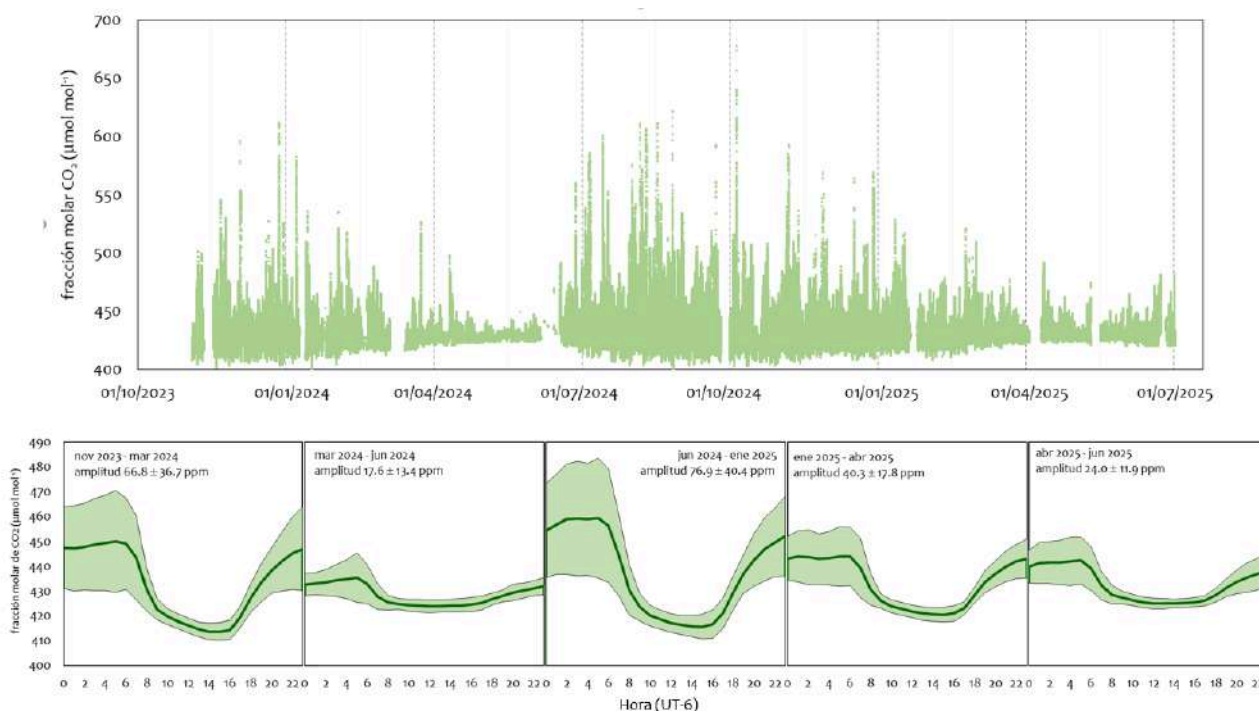


Fig. 6.6. Arriba: fracción molar (concentración) de CO₂ en aire atmosférico promedio por minuto (nov 2023 - julio 2025). Abajo: ciclos diarios del promedio horario de la misma concentración en diversas épocas del periodo de medición.

A este ciclo diario del CO₂ atmosférico contribuyen dos efectos independientes: por un lado la altura de la capa límite atmosférica (el grosor de la porción de la atmósfera más próxima a la superficie) disminuye con el descenso de temperaturas durante la noche, lo que provoca un aumento en la concentración de los gases traza por simple disminución del volumen total; por otro lado, la vegetación y el suelo circundantes al sitio de medición adicionan CO₂ a la atmósfera durante la noche por medio de la respiración. Si bien tanto el suelo como las plantas intercambian CO₂ durante el día y la noche, en la noche el flujo respiratorio no se ve balanceado por la captura fotosintética de CO₂ que puede dominar durante el día para este tipo de vegetación. Para evaluar la importancia relativa de cada uno de estos factores en el patrón diario observado en el OMECCA se requieren una mayor cantidad de observaciones y un análisis a profundidad, pero el hecho de que el factor meteorológico más disímil entre los periodos de abril a junio (secas) y junio a noviembre (lluvias) es la precipitación y no la temperatura, hace posible inferir que la disponibilidad de agua impacta significativamente la actividad de la vegetación y el suelo y determina el patrón de concentración de CO₂ observado a lo largo del año. A las concentraciones nocturnas elevadas también pueden contribuir las quemas agrícolas en la región, sin embargo estas actividades se llevan a cabo principalmente como preparación de las tierras antes de la época de lluvias, como fue explicado en la sección 6.2, por lo que no explicarían las diferencias estacionales observadas.

La dominancia del flujo respiratorio en la variabilidad diaria puede observarse también en la figura 6.7, que muestra la evolución anual para 2024 en la concentración promedio diaria para el periodo nocturno (0 a 5 h) y diurno (9 a 16 h). **El ciclo anual del CO₂ atmosférico durante el día es similar al patrón típico del hemisferio norte, con un máximo entre mayo y junio, hacia el final de la primavera, y un mínimo entre septiembre y octubre, hacia el final de la temporada de crecimiento, cuando se ha alcanza la máxima acumulación de carbono atmosférico capturado en la biomasa vegetal por medio de la fotosíntesis.** Es notable que el patrón anual de la concentración nocturna es el predominante en la evolución anual en Calakmul y no este ciclo diurno típico, como puede apreciarse en la similitud del panel superior izquierdo de la figura 6.7 y la evolución anual total por minuto mostrada en la figura 6.6. La predominancia del flujo respiratorio nocturno podrá ser evaluada más apropiadamente con la instalación de una torre de monitoreo de flujos ecosistémicos de CO₂, agua y energía en la RBC, que tendrá lugar durante 2026.

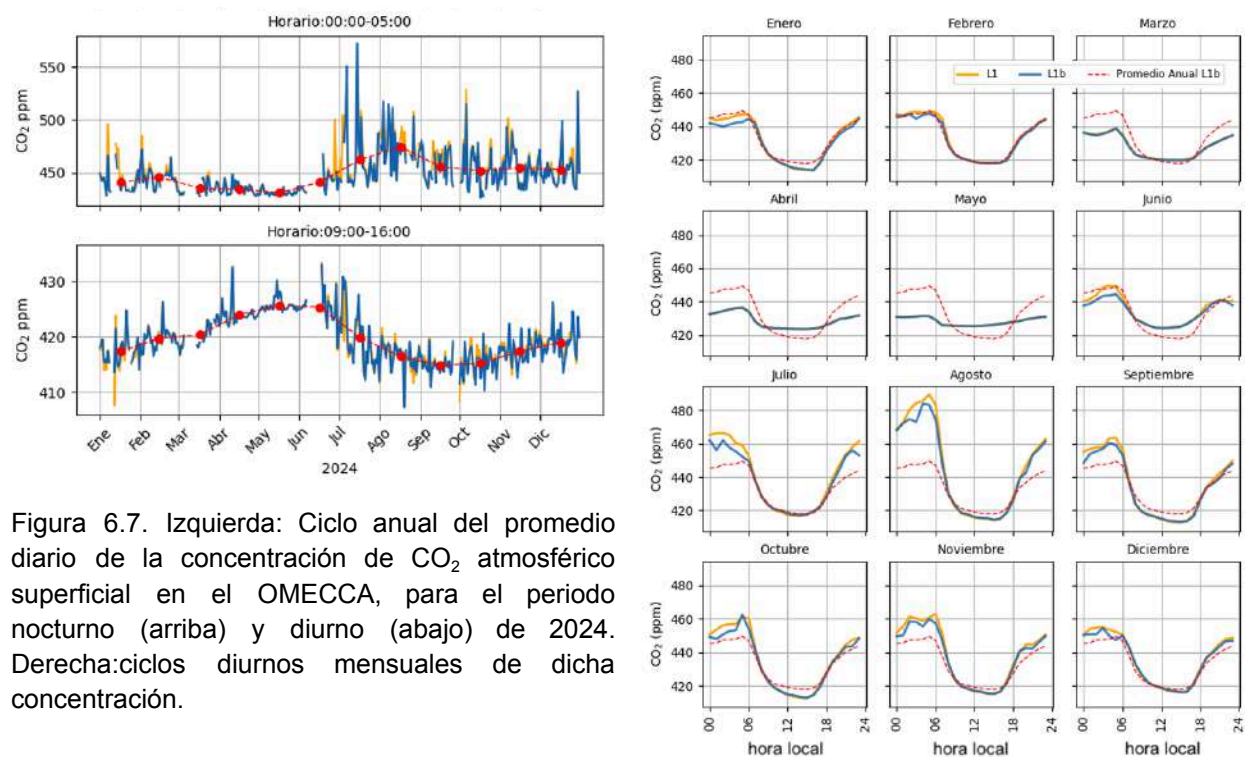


Figura 6.7. Izquierda: Ciclo anual del promedio diario de la concentración de CO₂ atmosférico superficial en el OMECCA, para el periodo nocturno (arriba) y diurno (abajo) de 2024. Derecha: ciclos diurnos mensuales de dicha concentración.

Una técnica de filtrado ampliamente utilizada en el análisis de la serie temporal del promedio diario de la concentración de CO₂ (Thoning et al., 1989; Thoning, 2018) permite distinguir la contribución de la tendencia (o tasa de cambio a largo plazo) y la variación debida al ciclo estacional y otros de menor duración. La aplicación de este análisis a la serie de 2024 arroja que **la fracción molar de CO₂ atmosférico de superficie medida en el OMECCA creció a una tasa de 2.2 ppm/año, por debajo del nivel extraordinario de 3.3 ppm/año registrado en el mismo periodo en el observatorio Mauna Loa, pero cercana a la tendencia promedio del periodo 2014-2023 (2.5 ppm/año) registrada en el mismo sitio.** El observatorio de Mauna Loa se considera representativo de las condiciones del hemisferio norte y se encuentra ubicado a una latitud comparable a la del OMECCA (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html>).

6.4. Percepción remota

6.4.1. Observaciones en superficie

El interferómetro IFS 125HR, descrito en el capítulo, determina las concentraciones integradas en la columna vertical de la atmósfera a través de la medición espectroscópica de la luz directa del Sol. Esta medida es equivalente a la determinación de columna medida desde instrumentos satelitales, los cuales analizan la luz reflejada por la superficie, integrando por consiguiente dos veces el paso a través de la atmósfera. La figura 6.8 presenta los resultados de la fracción molar del dióxido de carbono (X_{CO_2}) por encima del OMECCA, desde que se instaló el instrumento hasta septiembre del 2025. Las mediciones realizadas por OMECCA están representadas por los puntos azules, mientras que en amarillo se grafican las observaciones coincidentes en tiempo y espacio del instrumento OCO-2.

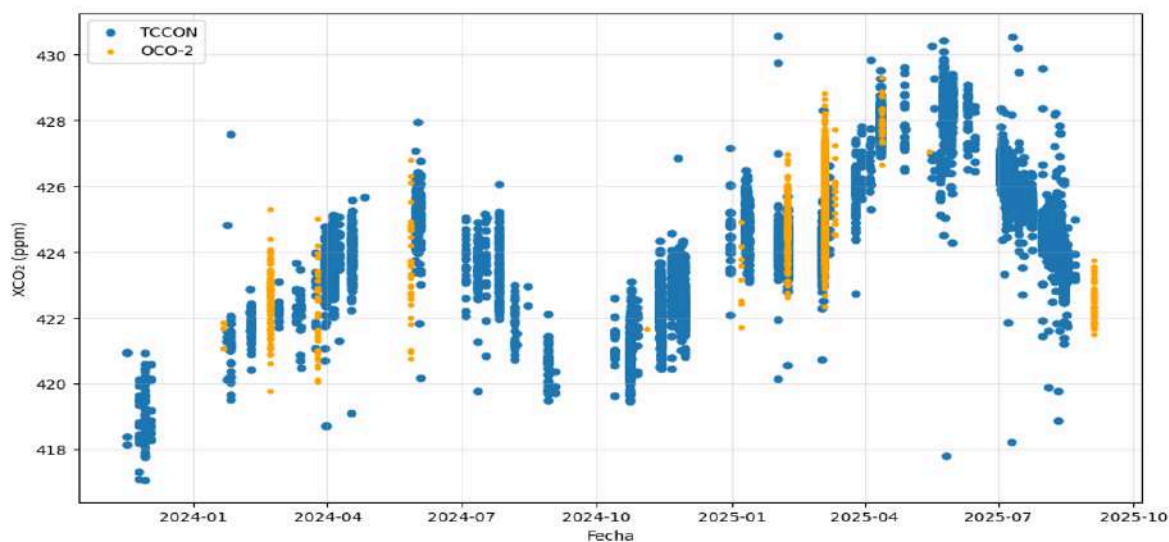


Figura 6.8. Valores de X_{CO_2} medidos con el interferómetro IFS 125HR en el OMECCA en azul, y los valores correspondientes medidos con el instrumento satelital OCO-2.

6.4.2. Observaciones satelitales

El satélite OCO-2 tiene dos modos de observación. NADIR es el modo operacional en el que se mide la radiancia reflejada por la superficie mientras el satélite orbita y pasa por el sitio de interés, y el modo TARGET. En este último el instrumento satelital realiza barridos alrededor de puntos de medición en superficie, como lo es OMECCA, para poder obtener una malla más densa de observaciones.

En el mapa de la figura 6.9 se muestran puntos más densamente ubicados alrededor de Zoh Laguna, donde se encuentra el Observatorio, que comprenden las mediciones tipo TARGET, así como los puntos más espaciados que corresponden a el paso del satélite realizando mediciones tipo NADIR. En esa misma figura se muestra una gráfica en la que se correlacionan las mediciones coincidentes tanto del instrumento satelital OCO-2 con las mediciones realizadas por OMECCA. A pesar de que la pendiente es muy cercana a la unidad, la dispersión es alta debido a que el número de coincidencias es baja y la calidad de los datos durante los primeros meses de operación del interferómetro no fue óptima,

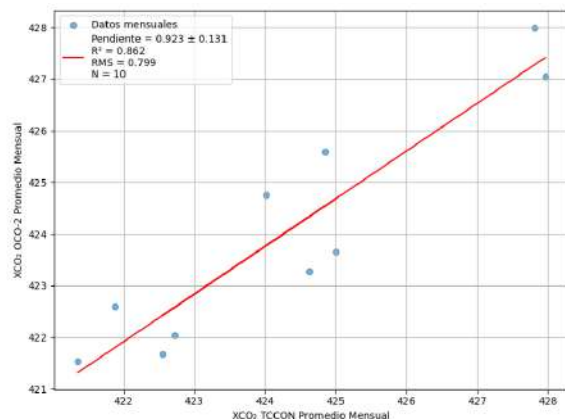


Figura 6.9. Mapa de Zoh Laguna, Camp. con los puntos del paso del instrumento satelital OCO-2 (izq.) durante el 2024 y 2025 y la correlación (derecha) de los valores de XCO₂ medidos en superficie (TCCON) con las observaciones satelitales (OCO-2).

Además de la concentración de CO₂, hay productos a partir de observaciones satelitales que son muy útiles para entender cuál es la capacidad del bosque tropical para absorber CO₂ y emitirlo de regreso a la atmósfera. Estos flujos se pueden medir directamente desde una torre (ver capítulo 9 sobre lo que estamos haciendo en una segunda fase del proyecto) pero también existen estimaciones para saber cual es la producción primaria bruta de la vegetación (GPP, por sus siglas en inglés). Este parámetro resulta muy importante porque indica cuál es la cantidad total de carbono que las plantas capturan de la atmósfera mediante la fotosíntesis.

Un parámetro que tiene una importancia muy grande como indicador de la GPP, es la Fluorescencia Inducida por el Sol (SIF), ya que tienen una alta correlación. Entre mayor fluorescencia detecta el sensor remoto, mayor GPP existe en el ecosistema. Por eso ya hay productos satelitales, como el GOSIF, que proveen esta información con cobertura global. Sin embargo, todavía presentan grandes incertidumbres y necesitan ser validados con mediciones como las que realiza el OMECCA.

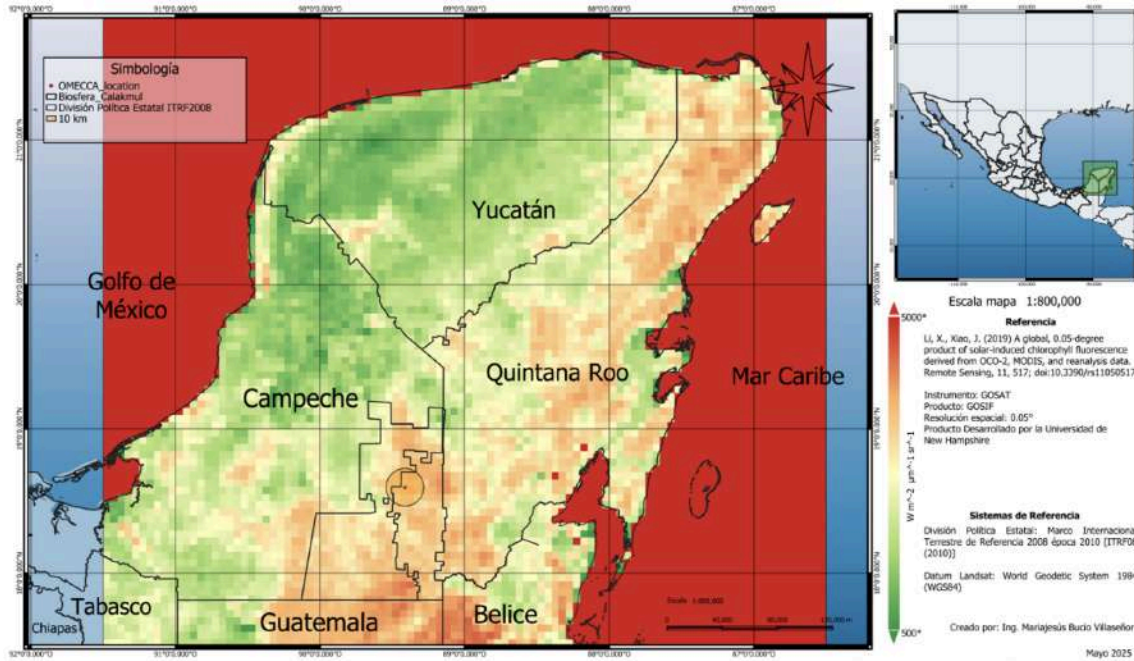


Figura 6.10. Mapa de Fluorescencia Inducida por el Sol (SIF) a partir del producto satelital GOSIF basado en mediciones de GOSAT y MODIS para el mes de abril del 2024. El OMECCA está marcado con un punto rojo y un círculo.

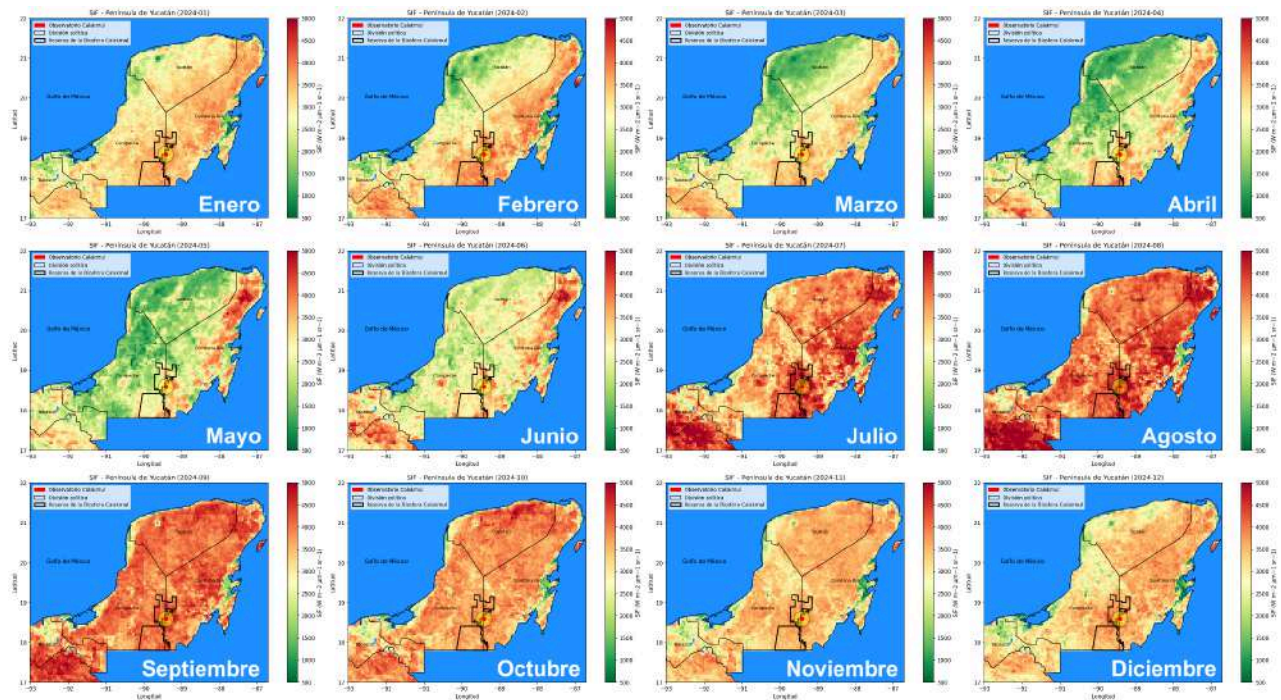


Figura 6.11. Secuencia de mapas mensuales de SIF para el año 2024 en la Península de Yucatán, en la que se visualizan colores más rojos (mayor fluorescencia) conforme crece la vegetación y aumenta la GPP.

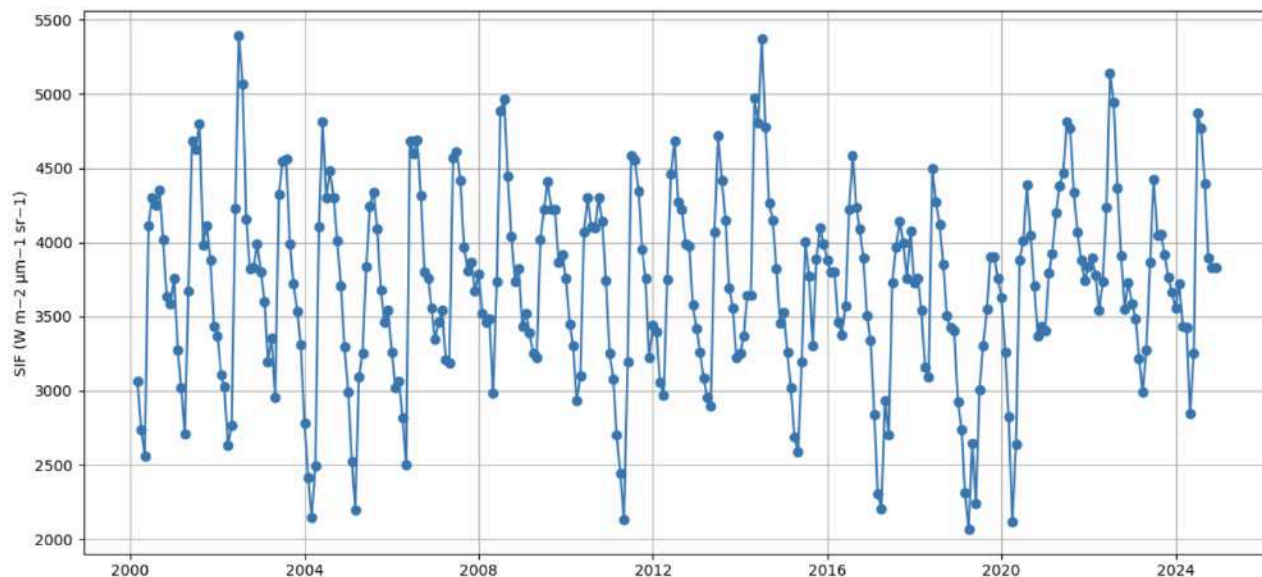


Figura 6.12 Serie de tiempo de los valores de SIF obtenidos a partir del producto satelital GOSIF sobre el punto geográfico del OMECCA.

La progresión mensual del producto GOSIF ilustrado en la figura 6.11 confirma la dinámica espacio-temporal de la productividad vegetal en la Península de Yucatán, que presenta un claro gradiente geográfico de menor a mayor productividad de noroeste a sur-sureste de la región. Este gradiente se correlaciona cercanamente al de la precipitación media anual en la península, y se superpone a la dinámica de la temporada de crecimiento, que alcanza su máximo entre junio y octubre de cada año. El cambio en la magnitud de la SIF a lo largo del año es mayor en el extremo noroeste de la Península, caracterizada por la estacionalidad climática y fenológica más marcada de las selvas bajas caducifolias. En estos mapas es posible apreciar que las selvas bajas y medianas subperennifolias del sur y sureste de la Península tienen un decrecimiento de verdor menos pronunciado que los ecosistemas del noroeste. La relación entre este producto satelital y el GPP medido en superficie es uno de los aspectos del ciclo del carbono más importantes a evaluar en el futuro cercano, ya que GPP constituye la principal vía de secuestro de carbono atmosférico en el ecosistema y por lo tanto comprender los mecanismos de control de su magnitud resulta esencial para proponer acciones de mitigación con bases científicas sólidas. Si bien la validación se realizará de manera puntual en el sitio de medición de flujos ecosistémicos del proyecto (sección 9), el producto satelital GOSIF -una vez validada su correlación a GPP- constituirá una herramienta invaluable para el escalamiento espacial de la estimación de la productividad.

La serie de tiempo presentada en la figura 6.12, muestra la variabilidad estacional de la SIF, característica de la temporada de crecimiento y el posterior decaimiento de la cobertura vegetal. Lo interesante en esta secuencia de datos mensuales, es que existe una variabilidad interanual adicional al ciclo estacional, que es producida por factores externos, como puede ser una sequía,

o el paso de un ciclón tropical. Entender los forzantes de estos cambios y saber cómo se puede alterar la capacidad de captura de carbono es el objetivo principal de este proyecto.

6.5. Respiración del suelo

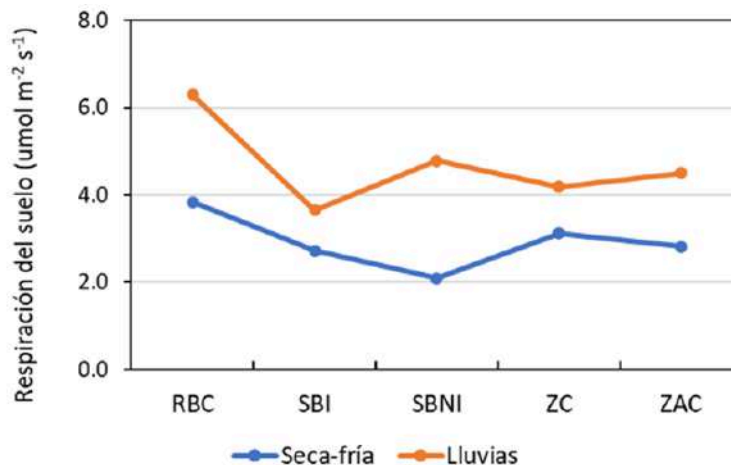


Figura 6.13. Respiración de suelo en los diferentes sitios de muestreo durante la temporada seca-fría y temporada de lluvias.

Las mediciones de respiración de suelo en la RBC y los sitios de muestreo en el Ejido Nuevo Bécál permitieron una evaluación prospectiva de la magnitud y variabilidad esperable en este importante flujo ecosistémico de CO₂. La figura 6.13 muestra la variabilidad entre sitios y temporadas del año de la tasa de respiración, que en general alcanzó valores menores durante la época seca-fría de 2023 (noviembre) que durante las lluvias, un resultado esperado dado que tanto la actividad microbiana como la respiración radical se ven limitadas durante el estiaje. No existieron diferencias significativas entre sitios en la época seca, y solamente la respiración del sitio de la RBC fue estadísticamente mayor durante el muestreo de la época lluviosa (junio 2024).

Interesantemente, la selva baja no inundable cercana a la aguada Chumaquil presentó la mayor diferencia estacional en la magnitud de la respiración, comparable a la de la RBC. La magnitud de las tasas de las zonas bajo manejo y adyacente sin manejo fueron notablemente similares entre sí en cada época del año.

7. Difusión

7.1. Eventos con la sociedad

La difusión de las investigaciones que se realizan a través de este proyecto y el acercamiento con la sociedad, en particular los jóvenes, es una componente fundamental del proyecto. El registro fotográfico de algunas de estas actividades se puede consultar en los informes parciales de los anexos 1-10.

- 09/02/2023 Visita a UACAM, Campeche e impartición de seminario “El proyecto Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica a desarrollarse en Campeche”
- 17/03/2023 Visita de los alumnos de la ENCiT (Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra) de la UNAM al contenedor aún ubicado en Ciudad Universitaria, durante la etapa de adecuación e instalación y realización de las pruebas de los instrumentos.
- 18/10/2023 Acto de inauguración del contenedor OMECCA en las instalaciones del ICAYCC, Ciudad Universitaria CDMX, donde acudió el Dr. William Lee Alardín, Coordinador de la Investigación Científica de la UNAM, los Drs. Salvador Landeros Ayala y Jorge Zavala Hidalgo, los entonces directores de la Agencia Espacial Mexicana y del ICAYCC-UNAM.
- 29/11/2023 Una vez trasladado OMECCA a su ubicación final y ya en operación, se llevó a cabo el acto oficial para su inauguración en las oficinas de la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC) en Zoh Laguna, Campeche. Asistieron el presidente municipal de Calakmul, el director de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, y otras autoridades de la región, acompañados por varias decenas de alumnos de instituciones de educación de la región como la Universidad Técnica de Calakmul (UTC), el Centro de Bachillerato Tecnológico Forestal No. 07 entre otras.
- 15/02/2024 Plática a los alumnos de la carrera de Ingeniería bioquímica ambiental de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la UACAM. Con la presentación titulada “El proyecto del Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica que se desarrolla en Campeche”,
- 16/02/2024 Organización de un taller enfocado en dar a conocer algunas de las investigaciones que se están llevando a cabo en la Península de Yucatán en materia de las ciencias de la atmósfera y el suelo, con participación de la UNAM (ICAYCC, II, UNITA), UACAM, ECOSUR (Campeche y Villahermosa), UADY y el INAH. Visita al OMECCA en Zoh Laguna el día siguiente.
- 15/03/2024 Visita de un grupo de 30 estudiantes y dos profesores de la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM) al OMECCA y a la Reserva de la Biósfera de Calakmul.
- 2025 Se recibieron varias visitas de alumnos de la UTC a lo largo del año, una de representantes de la UNESCO

7.2. Eventos académicos

- 01/05/2023 Participación en el *Joint Science Meeting for TEMPO, GeoXO ACX & TOLNet* en la Universidad de Huntsville, Alabama (EUA) con la impartición de una ponencia en la sesión “*Validation Components and Plans*” titulada “*Validation Activities in Mexico*” y como panelista en la sesión “*Paving the Future of Geostationary Air Quality Observations*”.
- 16/10/2023 Participación en el 47° Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo en en Centro de Convenciones de la UNAM, con la presentación de un cartel titulado “MONITOREO DE FLUJOS DE CO2 DEL SUELO EN EL OBSERVATORIO MEXICANO DEL CLIMA Y LA COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA (OMECCA)”.
- 06/03/2024 Plática impartida en la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la UNAM en Mérida a estudiantes y al personal docente titulada “Ciclo de carbono y su efecto en el balance de energía de nuestro planeta”
- 23/04/2024 Participación en Simposio Técnico – Comunitario “Identificando el manejo de la vegetación secundaria y acahuales en la Península de Yucatán”, que se llevó a cabo (3 días) en la UTC (Universidad Técnica de Calakmul) en Xpujil, Campeche, organizado por *USAid*, el *US Forest Service* y el Ejido Nuevo Becal. Se presentó el trabajo: “Proyecto OMECCA Monitoreo de concentraciones, flujos y almacenamiento de carbono”.
- 08/07/2024 Participación la [reunión anual NDACC/IRWG-COCCON-TCCON 2024](#) en Boulder, Colorado, con la impartición de las ponencias “A new station over the Calakmul tropical forest in Mexsico” y “Altzomoni site report” para dar a conocer las actividades que se realizan en este país en materia de monitoreo de cambios en la composición de la atmósfera. En este congreso participan integrantes de las redes internacionales *Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*, *COllaborative Carbon Column Observing Network (COCCON)* y *Total Column Carbon Observing Network (TCCON)*.
- 08/07/2024 Impartición de plática titulada “Ciclo de carbono y su efecto en el balance de energía de nuestro planeta” en el Colegio de la Frontera Sur – Unidad Campeche.
- 04/10/2024 Impartición de ponencia titulada “Constraste en los flujos de carbono en una megaciudad y un área natural protegida” en el seminario institucional de ICAYCC - UNAM, en Ciudad Universitaria, CDMX.
- 01/11/2024 Presnetación de cartel titulado “VARIABILIDAD DE LOS PRINCIPALES FLUJOS DE CARBONO, AGUA Y ENERGÍA EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN” en la Reunión Anual de la Unión Geofísica mexicana, celebrada en Puerto Vallarta, México.
- 16/06/2025 Cartel presentado en la Reunión IRWG/TCCON/COCCON titulado “ Carbon measurements at a tropical forest Universidad Nacional with the Calakmul Atmospheric Observatory” celebrada en Nainital, India.
- 24/06/2025 Impartición de seminario virtual titulado “Flujos de carbono en ambientes extremos: la megaciudad de México y un bosque tropical” como parte de los seminarios del IGAC-AWG (International Global Atmospheric Chemistry project - the Americas Working Group)

08/10/2025 Participación en la reubión anual del Programa Mexicano del Carbono con las pláticas "Variabilidad del CO2 atmosférico en Calakmul, Campech", "Avances en el estudio de la respiración y propiedades edáficas en ecosistemas tropicales de la Península de Yucatán" y el cartel "Variabilidad de los flujos de carbono, agua y energía en la Península de Yucatán" en Ciudad Universitaria, CDMX.

7.3. Notas periodísticas y divulgación

ICAYCC-UNAM, a través de sus canales de Facebook y YouTube, elaboró [una nota](#) con el nombre del proyecto OMECCA, explicando los alcances y objetivos del mismo, y el cual fue replicado en varios medios de comunicación:

(<https://www.atmosfera.unam.mx/observatorio-mexicano-del-clima-y-la-composicion-atmosferica-omecca/>)

Artículo de divulgación publicado en la Gaceta de la UNAM el 30 de noviembre del 2023, en la que se incluye un video elaborado por *UNAM Global*.

(<https://www.gaceta.unam.mx/tag/observatorio-mexicano-del-clima-y-la-composicion-atmosferica-omecca/>).

ICAYCC-UNAM elaboró un video informativo que se difundió a través de su canal de YouTube, con 2.5k reproducciones explicando los alcances y objetivos del proyecto OMECCA:

(<https://www.youtube.com/watch?v=CnOazw0ta1I>)

Nota en la página oficial de la AEM cuya información se replicó en varios medios de comunicación

(<https://www.gob.mx/aem/articulos/proyecto-omecca-iniciara-operaciones-este-mes-estudiara-cambio-climatico-con-datos-satelitales-350652>)

Participación en Exposición Colectiva “Tesoros de CALAKMUL: Primer patrimonio mundial mixto de México” con dos fotografías representando el proyecto del Observatorio Mexicano del Clima y la composición Atmosférica (OMECCA), inaugurada el 08 de julio del 2024 y cuya exposición en las rejas del bosque Chapultepec (Avenida Reforma, CDMX) se mantuvo durante dos meses.

8. Entregables

8.1. Informes

Acompañado a este informe técnico final sobre las actividades y alcances de este proyecto, se incluyen los informes parciales (Anexos 1 - 10) elaborados cada tercer mes desde el inicio del proyecto. Estos documentos se encuentran disponibles en formato

electrónico para su descarga a través de la URL correspondiente a la página web del proyecto dada a conocer a continuación.

8.2. Bases de datos y página Web

Los datos registrados por el Observatorio Atmosférico Calakmul, se encuentran disponibles al público en general a través del sitio web de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) y en la página del proyecto, que se listan a continuación.

Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA)

<https://ruoa.unam.mx/> (ir a Estaciones Meteorológicas >> CMUL)

Página web del proyecto:

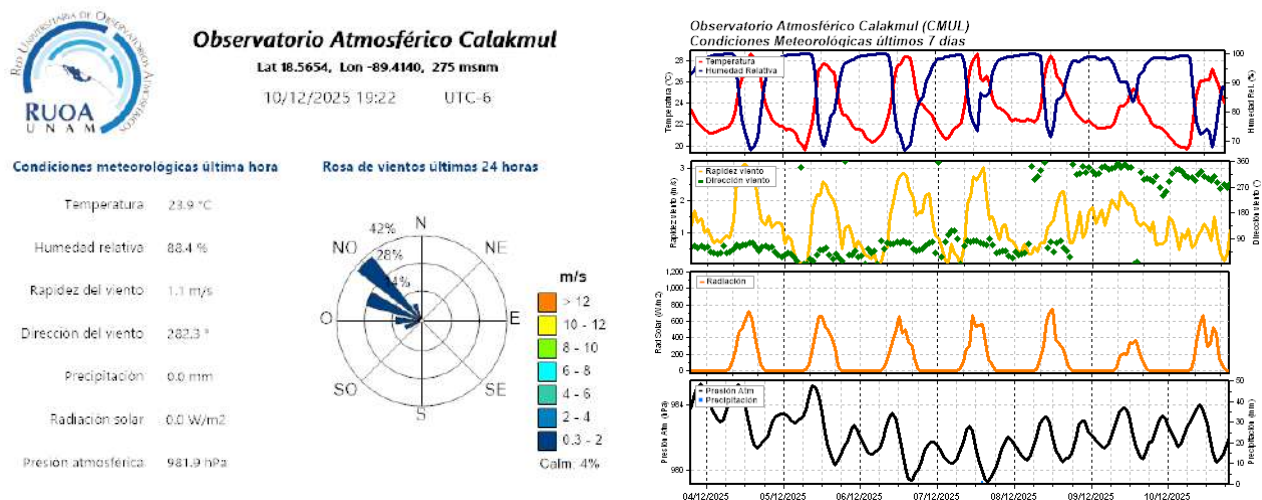
<http://www.epr.atmosfera.unam.mx/#Calakmul>

Para el acceso y visualización de datos meteorológicos en tiempo real (últimos 7 días):

https://www.ruoa.unam.mx/Pictures/CMUL_MET.png

Para consultar las condiciones actuales (última hora)

https://www.ruoa.unam.mx/Pictures/CMUL_TR.png



9. Estrategia de monitoreo 2025-2028

Varias líneas de evidencia obtenidas por este proyecto confirman los resultados de otros estudios sobre la importancia que la actividad de la vegetación y el suelo tienen como determinantes de las concentraciones de los GEI en la atmósfera de la Península de Yucatán. El intercambio o flujo neto de carbono entre los ecosistemas y la atmósfera son resultado del balance entre procesos de captura de CO₂ a través de la fotosíntesis y la acumulación de biomasa en suelos, y su pérdida por respiración, mortalidad natural y mortalidad inducida. Estos procesos están modulados a su vez por factores climáticos, topográficos y bióticos, y aún pequeñas alteraciones en éstos pueden modificar significativamente su magnitud y dirección, e impactar por lo tanto la composición atmosférica a nivel local y regional.

Sin menoscabo de la continuación de las mediciones de superficie y percepción remota que se llevan a cabo de manera rutinaria en el OMECCA, y con el objetivo de contribuir a reducir la incertidumbre sobre los balances de C en la península, **desde enero de 2025 este proyecto ha incorporado dos estrategias de estudio adicionales de mediciones en vegetación y suelo, que complementan naturalmente lo realizado en materia de monitoreo atmosférico.** Al mismo tiempo, se ha ampliado el alcance geográfico de las mediciones en superficie, para abarcar los dos extremos del gradiente eco-climático de la Península: las selvas subcaducifolias y subperennifolias del extremo más húmedo del sur y las selvas bajas caducifolias del extremo más árido al noroeste.

9.1. Descripción

Los sitios y componentes adicionales en esta nueva etapa del proyecto, son:

- **Monitoreo de flujos ecosistémicos de CO₂, vapor de agua y energía mediante la adición de una torre instrumentada para este fin cerca del Yacimiento Arqueológico de Oxpepul, Calakmul, Campeche (18.318° N, 89.798° O, 214 m snm), en el interior de la RBC** y a unos 60 km de distancia del OMECCA (Fig. 9.1). La torre arriostrada, de 40 m de altura, se encuentra ya erigida en el sitio, se ha equipado con un sistema autónomo de energía eléctrica por medio de paneles solares y baterías. El equipo de monitoreo de flujos por medio de la técnica de covarianza turbulenta se instalará a 35 m de altura (15 m por encima del dosel vegetal) a inicios de 2026. Las mediciones del intercambio entre la vegetación y la atmósfera se realizarán de manera continua y a alta frecuencia (10 Hz), y se complementarán con un sistema de monitoreo de flujos no turbulentos de calor en suelo, así como temperatura y humedad a tres distintas profundidades, que se encuentra ya instalado. El balance de energía del ecosistema se complementará con el monitoreo de los componentes de onda corta y larga de radiación entrante y saliente sobre un plano horizontal, por encima del dosel.

- Se reactivó un sitio preexistente de monitoreo de flujos ecosistémicos, idéntico al descrito anteriormente, en el noroeste de la Península, en una vasta zona cubierta por selva baja caducifolia en la Reserva Ecológica Estatal de El Palmar, Yucatán (21.0293°N, 90.0637°W, 1.86 m snm).

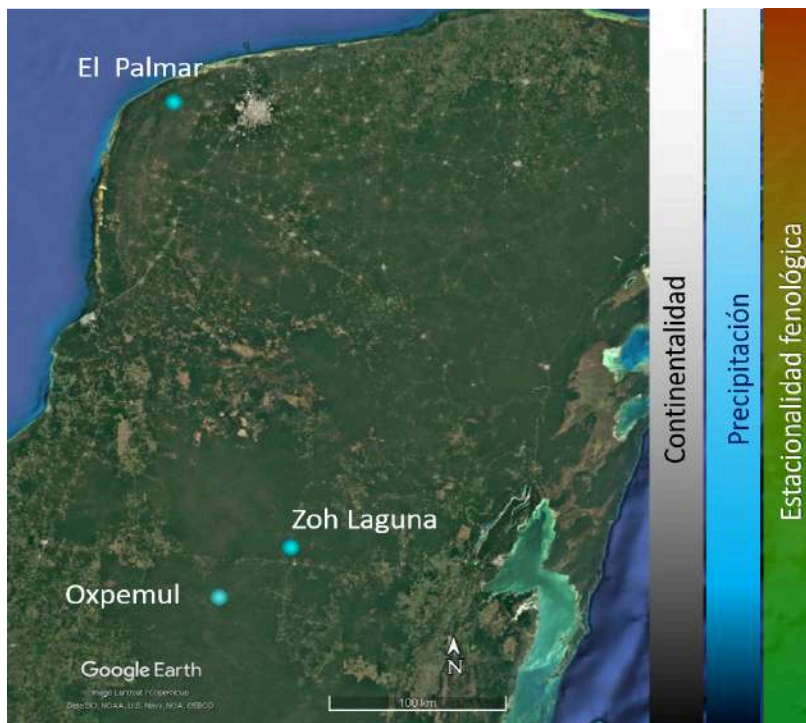


Fig. 9.1. Sitios de estudio (Oxpemul y El Palmar) que se incorporan en el periodo 2025-2027 como parte de la ampliación del proyecto OMECCA. Se indica visualmente la dirección de los gradientes eco-climáticos de la Península de Yucatán relevantes en esta etapa del proyecto.

- Ambas torres cuentan con instrumental para el **monitoreo de las condiciones meteorológicas**, con las mismas capacidades que el equipo análogo del OMECCA.
- La segunda estrategia consiste en la realización de **campañas intensivas de muestreo de elementos y flujos del continuo suelo-vegetación-atmósfera, y el empleo de técnicas analíticas para desagregar los flujos y conocer la magnitud de los almacenes de C en los distintos compartimentos del suelo y la vegetación.** Las campañas tuvieron lugar en los meses de abril y septiembre de 2025 en los sitios de El Palmar y Oxpemul, y se verificarán nuevamente en las temporadas fría-seca (febrero) y húmeda (agosto) en 2026. En la primera de estas campañas se realizaron las siguientes mediciones por una única vez:
 - caracterización de un perfil pedológico;
 - estimación de los almacenes de carbono en la biomasa aérea, materia orgánica muerta y en suelo;
 - determinación de los contenidos de carbono orgánico y carbono inorgánico mineral del suelo,

- análisis mineralógico y de componentes de la materia orgánica del suelo,
 - parámetros fisicoquímicos del suelo como pH, textura, color, capacidad de intercambio catiónico, contenidos de N y P, conductividad eléctrica y densidad aparente.
-
- En cada campaña se realizan **muestreos de respiración del suelo** utilizando cámaras de acumulación, con la técnica descrita anteriormente. Para desagregar los procesos contribuyentes a la tasa de emisión de CO₂ del suelo, se determinarán adicionalmente:
 - la respiración basal por incubación con trampa alcalina de NaOH,
 - la respiración microbiana inducida por adición de glucosa,
 - el componente respiratorio de origen abiótico (calcáreo) mediante esterilización con cloroformo de submuestras de suelo y colorimetría de flujo continuo en submuestras esterilizadas y no esterilizadas.
 - **Mediante el uso de técnicas analíticas de isotopía se estimarán el tiempo de residencia del carbono y el agua en sus diferentes compartimientos de almacenamiento.** Los isótopos estables y el radiocarbono permiten establecer tanto los tiempos de residencia de los elementos como sus fuentes de origen, lo que permite evaluar el impacto de cambios ambientales y de origen humano en la magnitud y dinámica de dichos compartimientos. Esta estrategia de monitoreo incluye la recolección de muestras de aire a diferentes alturas del dosel vegetal y proveniente de la respiración de suelo, muestras de suelo superficial, agua de lluvia y vegetación.
 - Finalmente, esta etapa del proyecto incluye la **validación del producto satelital GOSIF a nivel de superficie mediante la medición directa en superficie de SIF** en cuatro especies vegetales dominantes por sitio con un analizador portátil de fotosíntesis y fluorescencia.

9.2. Financiamiento

El proyecto cuenta con financiamiento proveniente del **Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT IG101225)** de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, para el periodo 2025-2027.

Adicionalmente, el **Laboratorio Nacional Conahcyt MexFlux (LNC-MexFlux)** de monitoreo de flujos ecosistémicos proveerá financiamiento parcial en el periodo 2026-2028 para las dos estaciones.

9.3. Participantes

Hemos seguido contando con el **apoyo logístico y de vinculación en sitio del personal de la Reserva de la Biosfera Calakmul** de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

De manera adicional a los participantes enlistados en la sección 4 de este informe, se han incorporado al proyecto las siguientes personas:

Actividades	Participantes	Institución
Corresponsables de la etapa del proyecto (con Michel Grutter)	Bernardo Figueroa	Unidad Sisal del Instituto de Ingeniería, UNAM
	Laura E. Beramendi	Instituto de Geología, UNAM
Instalación de instrumental de monitoreo de flujos	Eugenia González del Castillo	ICAYCC - UNAM
Mantenimiento de la torre de El Palmar	Bernardo Figueroa Juan Alberto Gómez	Unidad Sisal del Instituto de Ingeniería, UNAM
Participación en campañas de muestreo	Jorge M. Uuh	Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM
Muestreo de suelo, aire, agua y vegetación	Laura E. Beramendi	Instituto de Geología, UNAM
Análisis isotópicos	Galia González	
Participación en campañas de muestreo		
Validación del producto satelital GOSIF	Josué E. Arellano	ICAYCC - UNAM
Determinación de los componentes de la respiración del suelo	Rodrigo Tec	
Participación en campañas de muestreo	Leticia del C. González Deb Raj Aryal	ECOSUR Unidad Campeche

10. Conclusiones

Según el análisis de los datos meteorológicos obtenidos por el Observatorio Atmosférico del Clima y la Composición Atmosférica (OMECCA) en este periodo, 2024 fue el año más caluroso, presentando una temperatura promedio en el mes de mayo de 29.4°C, mientras que en el 2025 el promedio para el mismo mes fue de 27.9 °C. En los meses de marzo a junio del 2024 se presentaron temperaturas máximas de 38.7 a 38.9 °C, mientras que el año siguiente éstas llegaron a 36.4°C. Durante el 2025 llovió 30% menos que en 2024, ya que los registros entre noviembre y octubre para estos periodos se registraron 833 y 1,190 mm de precipitación acumulada, respectivamente.

La medición de las concentraciones de partículas finas suspendidas en el aire PM10 (tamaños aerodinámicos menores a 10 µm) y PM2.5 (< 2.5 µm), arrojó niveles más altos de partículas en 2024, tanto PM10 como PM2.5, en los meses secos de febrero hasta principios de junio. A partir de esa fecha empezaron las precipitaciones y los niveles de partículas se redujeron significativamente. En el caso de PM10, se registraron concentraciones horarias por encima de las 400 µg/m³ en varias ocasiones, lo cual representa niveles de contaminación muy altos aunque por periodos muy cortos. Las PM2.5, que son inclusive más dañinas para la salud humana, también superaron con frecuencia valores de >200 µg/m³. Las condiciones secas que prevalecieron durante los meses de febrero a mayo del 2024, favorecieron las altas concentraciones de partículas que regularmente están asociadas a quemas domésticas, agrícolas, incendios forestales o la resuspensión de polvos.

Los promedios mensuales de PM10 y PM2.5 fueron significativamente menores en 2025 a las del año anterior durante este periodo. Otro factor que pudo influenciar los niveles observados durante el 2024 fue la mayor afluencia de vehículos pesados debido a las obras que estuvieron más activas durante este año. Los resultados obtenidos sugieren que las partículas PM10 son de origen principalmente local, como por ejemplo de quemas domésticas del poblado de Zoh Laguna, mientras que las partículas más finas (PM2.5), son transportadas de más lejos y provienen muy probablemente de incendios típicamente de la región de este y sureste de Campeche y/o Quintana Roo.

Resultados preliminares en las que comparamos las concentraciones de columna de CO₂ medidas con el OMECCA, son similares a las observaciones satelitales reportadas por el instrumento OCO-2. Una falla en el instrumento de superficie no nos permitió hacer una evaluación más precisa con los datos previos a junio del 2025, pero a partir de esa fecha el equipo se encuentra funcionando de manera óptima. También se empezó a trabajar con productos satelitales de fluorescencia inducida del Sol (SIF), parámetro que se puede relacionar directamente con la producción primaria bruta del ecosistema. Una

secuencia de mapas mensuales de éste parámetro muestra la estacionalidad de la productividad y su gradiente latitudinal en la Península de Yucatán.

La variabilidad de la concentración de CO₂ medida en superficie es mínima durante la época seca del año, particularmente de abril a mediados de junio, mientras que se incrementa considerablemente durante la época de lluvias. La amplitud u oscilación diaria en 2024 fue en promedio 4.3 veces mayor durante el verano (agosto-octubre) que durante el estío de primavera (abril a junio) del mismo año. Hace falta complementar con otros datos observacionales, pero de los patrones obtenidos en este estudio se puede inferir que la disponibilidad de agua impacta significativamente la actividad de la vegetación y el suelo y determinan el patrón de concentración de CO₂ observado a lo largo del año. El ciclo anual del CO₂ atmosférico medido en Calakmul durante el día es similar al patrón típico del hemisferio norte. La fracción molar medida en el OMECCA creció a una tasa de 2.2 ppm/año, aunque se necesitará un periodo más largo para conocer la tendencia real. La predominancia del flujo respiratorio nocturno podrá ser evaluada más apropiadamente con la instalación de una torre de monitoreo de flujos ecosistémicos de CO₂, agua y energía en la RBC, que tendrá lugar durante 2026.



11. Referencias

- Cede A, Tiefengraber M, Gebetsberger M, Kreuter A. 2019. Fiducial reference measurements for air quality: TN on PGN products “correct use” guidelines, version 1. LuftBlick. Innsbruck, Austria. Disponible en: <https://www.pandonia-global-network.org/wp-content/uploads/>
- Gaceta UNAM. 2023. El observatorio viajero de la UNAM, en Calakmul. *Gaceta UNAM* 5, 435.
- Grainger A. 2008. Difficulties in tracking the long-term global trend in tropical forest areas. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105, 818-823. [10.1073/pnas.0703015105](https://doi.org/10.1073/pnas.0703015105)
- IPCC 2023. Summary for Policymakers. En: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee y J. Romero (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, pp. 1-34. [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001).
- PGN (Pandonia Global Network): Pandonia data archive. Disponible en: <http://data.pandonia-global-network.org/>
- Rahman M, Islam M, Islam R, Sobuj NA. 2017. Towards sustainability of tropical forests: implications for enhanced carbon stock and climate change mitigation. *J Forest Environ Sc.*, 33, 281-294. [10.7747/JFES.2017.33.4.281](https://doi.org/10.7747/JFES.2017.33.4.281).
- SEMARNAT. 2022. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Principales Indicadores Forestales (Ciclo 2015-2020). <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020>. (consultado el 17/07/2024).
- Thoning KW. 2018. Python class for curve fitting time series in NOAA/ESRL/GMD. Disponible en <https://gml.noaa.gov/aftp/user/thoning/ccgcrv/> (consultado el 30/09/2025).
- Thoning KW, Tans PP, Komhyr WD. 1989. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985. *J Geophys. Res.* 94: 8549-8565. [10.1029/JD094iD06p08549](https://doi.org/10.1029/JD094iD06p08549)
- US-EPA. 2016. United States for Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/scram>.
- Yver-Kwok C, Philippon C, Bergamaschi P, Biermann T, Calzolari F, Chen H, Conil S, Cristofanelli P, Delmotte M, Hatakka J, Heliasz M, Hermansen O, Komínková K, Kubistin D, Kumps N, Laurent O, Laurila T, Lehner I, Levula J, Lindauer M, Lopez M, Mammarella I, Manca G, Marklund P, Metzger J-M., Mölder M, Platt SM, Ramonet M, Rivier L, Scheeren B, Sha MK, Smith P, Steinbacher M, Vítková G, Wyss S. 2021. Evaluation and optimization of ICOS atmospheric station data as part of the labeling process. *Atmos. Meas. Tech.* 14, 89-116, [10.5194/amt-14-89-2021](https://doi.org/10.5194/amt-14-89-2021).
- Zoogman P, Liu X, Suleiman RM, Pennington WF, Flittner DE, Al-Saadi JA, Hilton BB, Nicks DK, Newchurch MJ, Carr JL, Janz SJ, Andraschko MR, Baker BB, Canova BP, Chan Miller C, Cohen RC, Davis JE, Dussault ME, Edwards DP, Fishman J, González Abad G, Grutter M, Herman JR, Houck J, Jacob DJ, Joiner J, Kerridge BJ, Kim J, Krotkov NA, Lamsal L, Li C, Lindfors A, Martin RV, McElroy CT, McLinden C, Natraj V, Neil DO, Nowlan CR, O’Sullivan EJ, Palmer PI, Pierce RP, Pippin MR, Saiz-Lopez A, Spurr RJD, Szykman JJ, Torres O, Veefkind JP, Veihelmann B, Wang H, Wang J, Wulamu A, Chance K. 2017. Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (TEMPO). *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 186, 17-39. [10.1016/j.jqsrt.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.008).