



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVOLUCIÓN DEL pH MARINO Y DEL CICLO DEL  
CARBONO INORGÁNICO EN EL ARRECIFE  
CORALINO DE PUERTO MORELOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

**MARIANA DORANTES GALEANA**



DIRECTOR DE TESIS:

**DR. JOAN ALBERT SÁNCHEZ CABEZA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de Datos del Jurado

### 1. Datos del alumno

Dorantes  
Galeana  
Mariana  
55 61 49 68  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
312192402

### 2. Datos del tutor

Dr.  
Joan Albert  
Sánchez  
Cabeza

### 3. Datos del sinodal 1

Dr.  
José Gilberto  
Cardoso  
Mohedano

### 4. Datos del sinodal 2

Dra.  
Elsa  
Arellano  
Torres

### 5. Datos del sinodal 3

Dr.  
Jorge Alberto  
Ramírez  
Zierold

### 6. Datos del sinodal 4

Mtro.  
León Felipe  
Álvarez  
Sánchez

### 7. Datos de la tesis.

Evolución del pH marino y del ciclo del carbono inorgánico en el arrecife coralino de  
Puerto Morelos.  
85 p.  
2019

## Agradecimientos

A mi mamá Isabel por las enseñanzas, consejos, risas y todo lo que has compartido conmigo. A mi papá Sergio por aquellos debates cuando me ayudaba con mis tareas y por llevarme cada mañana a la escuela. A mi hermano Emilio por estar pendiente de mí y por las ocurrencias que hemos ideado. A los tres por todo su amor y apoyo incondicional, les debo todo lo que soy y son mi mayor ejemplo de vida.

A mi asesor de tesis, el Doctor Joan Albert Sánchez Cabeza, quien me brindó la oportunidad de realizar este trabajo y un lugar en el Laboratorio de Observatorios Costeros del Cambio Global. Gracias por compartir su tiempo y conocimiento conmigo, así como por su apoyo, por sus observaciones y su paciencia.

A mi abuela Reyna, a mis tías Martha e Imelda, a mis tíos Costa y Manuel y a mis primos Suhey, Jr., Jorge y Aiko.

A los amigos y amigas que conocí durante mis estudios en la UNAM, gracias por todos esos momentos de diversión, pláticas, pizzas y salidas para combatir el estrés, en especial a las Niñas Terrólogas, Diego Limón y Alejandro Durán, su amistad ha sido increíble. A Alejandro Bautista por su soporte y confianza en estas nuevas etapas.

A los doctores que formaron parte del jurado Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano, Dra. Elsa Arellano Torres, Dr. Jorge Ramírez Zierold y M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez por el tiempo dedicado a este trabajo, así como por sus comentarios y correcciones las cuales ayudaron a la mejora del mismo.

Este trabajo ha sido financiado por las siguientes instituciones:

- UNAM, proyecto PAPIIT IN110518.
- CONACYT: proyectos PDCPN2013-01/214349, SEMARNAT-2016-01-278634, CNR C0013-2016-05-277942.
- Proyectos de Cooperación Técnica del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA, Naciones Unidas) Organismo Internacional de la Energía Atómica (Naciones Unidas): RLA7020, INT7019.

Los datos recolectados en este proyecto son el resultado del esfuerzo de muchas personas, de las que deseo agradecer especialmente a M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez, M. en C. Edgar Escalante Mancera, M. en I. Miguel Ángel Gómez Reali y M. en C. Serguei Rico Esenaro.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Química del ciclo del carbono inorgánico</i>	1
1.1.1. Parámetros del sistema de carbonatos en el océano	2
1.1.2. Sistema de carbonatos	3
1.1.3. Estados de saturación	3
1.2. <i>Cambios del pH en el pasado</i>	5
1.3. <i>Cambio global y climático</i>	7
1.3.1. Efectos en el océano	8
1.4. <i>Acidificación oceánica</i>	8
1.4.1. Variación latitudinal	10
1.4.2. Variación estacional	10
1.4.3. Acidificación en la columna de agua	10
1.4.4. Acidificación en zonas costeras	11
1.4.5. Variación por océanos	11
1.4.6. Acidificación en el Mar Caribe	13
1.5. <i>Impactos biológicos de la acidificación oceánica</i>	13
1.5.1. Organismos planctónicos	14
1.5.2. Organismos bentónicos	15
1.6. <i>Justificación</i>	16
1.7. <i>Objetivos</i>	17
1.7.1. Objetivo general	17
1.7.2. Objetivos particulares	17
<b>2. Área de estudio</b>	<b>18</b>
2.1. <i>Geología</i>	19
2.2. <i>Meteorología</i>	19
2.3. <i>Oceanografía</i>	19
2.3.1. Arrecife de Puerto Morelos	20
2.3.2. Laguna arrecifal	21
<b>3. Metodología</b>	<b>22</b>
3.1. <i>Fuentes de datos</i>	22
3.1.1. Sensor <i>SeaFET</i>	22
3.1.2. Datos de pCO <sub>2</sub>	24
3.1.3. Datos de otras variables de interés	25
3.2. <i>Proceso de calificación de datos</i>	26
3.3. <i>Paquete de R seacarb</i>	27
3.4. <i>Análisis estadísticos</i>	28
3.4.1. Correlación de Spearman	29

3.4.2. Regresión local <i>loess</i> .....	30
3.4.3. Descomposición de la serie temporal de pH .....	30
3.4.4. Transformada <i>Wavelet</i> .....	31
3.4.5. Análisis de Factores.....	31
<b>4. Resultados .....</b>	<b>32</b>
4. 1. <i>Serie de pH</i> .....	33
4.1.1. Periodicidad.....	34
4. 2. <i>Series de oxígeno disuelto, temperatura y conductividad</i> .....	35
4.2.1. Correlaciones de las series de 2017 .....	38
4. 3. <i>Serie de pCO<sub>2</sub></i> .....	39
4. 4. <i>Series del periodo de estudio</i> .....	40
4.4.1. Variabilidad del pH .....	41
4.4.2. Periodicidad del pH .....	42
4.4.3. Correlaciones del periodo de estudio.....	42
4. 5. <i>Estados de saturación de CaCO<sub>3</sub></i> .....	43
4.5.1. Correlaciones con el sistema de carbonatos .....	44
<b>5. Discusión.....</b>	<b>46</b>
5.1. <i>Variabilidad del pH</i> .....	46
5.1.1. Variabilidad diaria .....	46
5.1.2. Variabilidad anual .....	47
5.2. <i>Valores extremos</i> .....	48
5.3. <i>Estados de saturación de CaCO<sub>3</sub></i> .....	49
5.3.1. Efectos de la acidificación oceánica en la calcificación .....	50
5.4. <i>Análisis de factores</i> .....	51
5.5. <i>Limitaciones</i> .....	54
5.6. <i>Perspectivas</i> .....	54
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>56</b>
<b>7. Referencias .....</b>	<b>57</b>
<b>8. Anexo.....</b>	<b>64</b>

# Índice de Figuras

1.1. Ciclo global del carbono.....	1
1.2. Formas cristalinas de aragonita y calcita .....	4
1.3. Media decadal de pH en la superficie oceánica de los años 1785, 1995, 2050, 2095. ....	9
1.4. Fotografías de microscopía electrónica de barrido de diferentes concentraciones de CO <sub>2</sub> . ....	15
2.1. Mapa de la zona de estudio y posiciones de las estaciones del Observatorio Costero de Puerto Morelos. ....	18
2.2. Corrientes marinas en la zona del Mar Caribe. ....	20
3.1. Diagrama del funcionamiento del sensor SeaFET Ocean pH. ....	24
3.2. Diagrama del sensor Mini CO <sub>2</sub> . ....	25
4.1. Diagrama de presencia de los datos aceptados del observatorio costero de Puerto Morelos. ....	32
4.2. Gráfica de pH con regresión local. ....	33
4.3. Distribución mensual de pH. ....	33
4.4. Wavelet de Transformada Continua de pH de 2017.....	35
4.5. Gráfica de conductividad. ....	35
4.6. Gráfica de oxígeno disuelto con regresión local. ....	36
4.7. Distribución mensual de oxígeno disuelto. ....	36
4.8. Gráfica de temperatura con regresión local. ....	37
4.9. Distribución mensual de la temperatura. ....	37
4.10. Gráfico de correlación de las series de 2017 del Observatorio Costero de Puerto Morelos.. ..	38
4.11. Serie de pCO <sub>2</sub> con regresión local. ....	39
4.12. Distribución diaria de pCO <sub>2</sub> . ....	39
4.13. Gráfica de pH y de pCO <sub>2</sub> para el mes de septiembre de 2016. ....	40
4.14. Gráfica de oxígeno disuelto (OD) y pCO <sub>2</sub> para el mes de septiembre de 2016. ....	40
4.15. Gráfica de temperatura para el mes de septiembre de 2016.....	41
4.16. Descomposición de la serie temporal de pH en el mes de septiembre de 2016. ....	41
4.17. Wavelet de Transformada Continua de pH de septiembre de 2016. ....	42
4.18. Gráfico de correlación de la base de datos del periodo de estudio de septiembre de 2016 .....	43
4.19. Estados de saturación de septiembre de 2016. ....	44
4.20. Gráfico de correlación de la base de datos del sistema de carbonatos .....	45
5.1. Gráfica de sedimentación de los eigenvalores obtenidos del análisis de 3 factores. ....	51
5.2. Gráfica de las cargas de los factores 1 y 2 con rotación varimax. ....	53
5.3. Gráfica de las cargas de los factores 1 y 3 con rotación varimax .....	53

## Índice de Tablas

1.1. Valores reportados del pH oceánico y de pCO <sub>2</sub> atmosférico desde el periodo Cretácico hasta el Cuaternario. ....	6
1.2. Valores promedio de parámetros oceanográficos globales. ....	12
1.3. Valores promedio de parámetros oceanográficos del Mar Caribe .....	13
2.1. Estaciones del Observatorio Costero de Puerto Morelos que registran datos marinos in situ. ..	18
3.1. Especificaciones de los sensores del Observatorio Costero de Puerto Morelos. ....	26
3.2. Variables del sistema de carbonatos obtenidas con la función “carb”. ....	27
3.3. Análisis y pruebas estadísticas que se realizaron a cada variable .....	28
3.4. Correlaciones $\rho$ de Spearman entre variables iguales de las estaciones 01 y 02 del observatorio costero de Puerto Morelos. ....	29
4.1. Resultados de la calificación de los datos del Observatorio Costero de Puerto Morelos .....	32
4.2. Estadística básica mensual de la serie de pH. ....	34
4.3. Correlaciones $\rho$ de Spearman de la base de datos de 2017. ....	38
4.4. Correlaciones $\rho$ de Spearman de la base de datos de 2016. ....	43
4.5. Correlaciones $\rho$ de Spearman de la base de datos del sistema de carbonatos. ....	44
5.1. Estadística básica de las series temporales del observatorio costero de Puerto Morelos. ....	48
5.2. Valores promedio de los estados de saturación de calcita y aragonita a nivel mundial y del Mar Caribe. ....	50
5.3. Matriz de cargas de los factores rotados con varimax de la base de datos del sistema de carbonatos. ....	52
5.4. Varianza proporcional y acumulativa de cada factor. ....	52

## Resumen

Uno de los impactos del cambio global es la acidificación oceánica, que consiste en la disminución del pH causada por el CO<sub>2</sub> antropogénico que se disuelve en el océano. Su principal consecuencia es la disminución de la calcificación de organismos como los corales. El presente trabajo tuvo como objetivo principal estudiar el comportamiento del pH y del ciclo del carbono inorgánico en el arrecife coralino de Puerto Morelos, Quintana Roo durante un periodo aproximado de dos años. Para registrar el pH marino se utilizaron sensores de pH *SeaFET*. También se midió el oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>, temperatura y conductividad mediante sensores en las estaciones del observatorio costero del cambio global en Puerto Morelos, Quintana Roo. Los datos se calificaron mediante cuatro filtros, siendo los datos de pCO<sub>2</sub> los de menor calidad (65.8% de datos no aceptados).

Se construyó una base de datos de las medidas de largo plazo (de uno a dos años de duración aproximadamente): pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad. Se obtuvo la estadística básica mensual y la variabilidad de la serie de pH, que presentó un intervalo de 7.78 a 8.11. Además, se conjuntó una base de datos con registros de estas variables más la pCO<sub>2</sub> de 17 días en septiembre de 2016. Posteriormente se calcularon los parámetros del sistema de carbonatos y se conformó una nueva base de datos con: pH, pCO<sub>2</sub>, oxígeno disuelto, temperatura, conductividad, alcalinidad, carbono inorgánico disuelto, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,  $\Omega_{\text{calcita}}$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}$ .

Para estudiar las frecuencias de variación se realizaron dos wavelets de transformada continua con la serie de 16 meses de pH y la serie de septiembre de 2016. Se calcularon las correlaciones entre las variables de cada base de datos entre las cuales destacan: la correlación entre pH y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  ( $\rho = 0.77$ , valor  $p < 0.05$ ), oxígeno disuelto y pCO<sub>2</sub> ( $\rho = -0.81$ , valor  $p < 0.05$ ) y temperatura y conductividad ( $\rho = -0.57$ , valor  $p < 0.05$ ). Se realizó un análisis de factores con los datos del sistema de carbonatos, con lo que se obtuvieron los principales procesos observados en tres factores: “sistema de carbonatos”, “fotosíntesis-respiración marina” y “masas de agua”. La serie de pH obtenida es el primer registro de alta frecuencia (30 minutos) para el Caribe mexicano, así como de los estados de saturación de CaCO<sub>3</sub> de septiembre de 2016, los cuales se encuentran en intervalos normales y favorables para la calcificación de corales.

# 1. Introducción

## 1.1. Química del ciclo del carbono inorgánico

La evolución biogeoquímica de la Tierra está influida por los intercambios de energía y materiales en forma particulada o disuelta, entre la corteza, la biósfera, la atmósfera y el océano. Los flujos de materia se comportan como circuitos cerrados que ocurren durante periodos muy largos y se conocen como ciclos biogeoquímicos, que pueden existir para cualquier sustancia, ya sea elemento o molécula. Uno de los principales ciclos es el del carbono (Figura 1.1), elemento esencial para la vida (Lalli y Parsons, 2013). La litósfera presenta las mayores cantidades de carbono inorgánico contenido en minerales, y en menor parte, carbono orgánico contenido en esquistos, combustibles fósiles y suelos. El segundo compartimento en cantidad de carbono es el océano, que contiene 50 veces más carbono que la atmósfera o la biósfera terrestre. La mayoría del carbono oceánico es inorgánico (98%), predominantemente en forma de bicarbonato (87%) en aguas intermedias y profundas (Libes, 2009). La atmósfera es el reservorio más pequeño y principalmente contiene carbono en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de metano ( $\text{CH}_4$ ) en menores cantidades (Libes, 2009; Raven *et al.*, 2005).

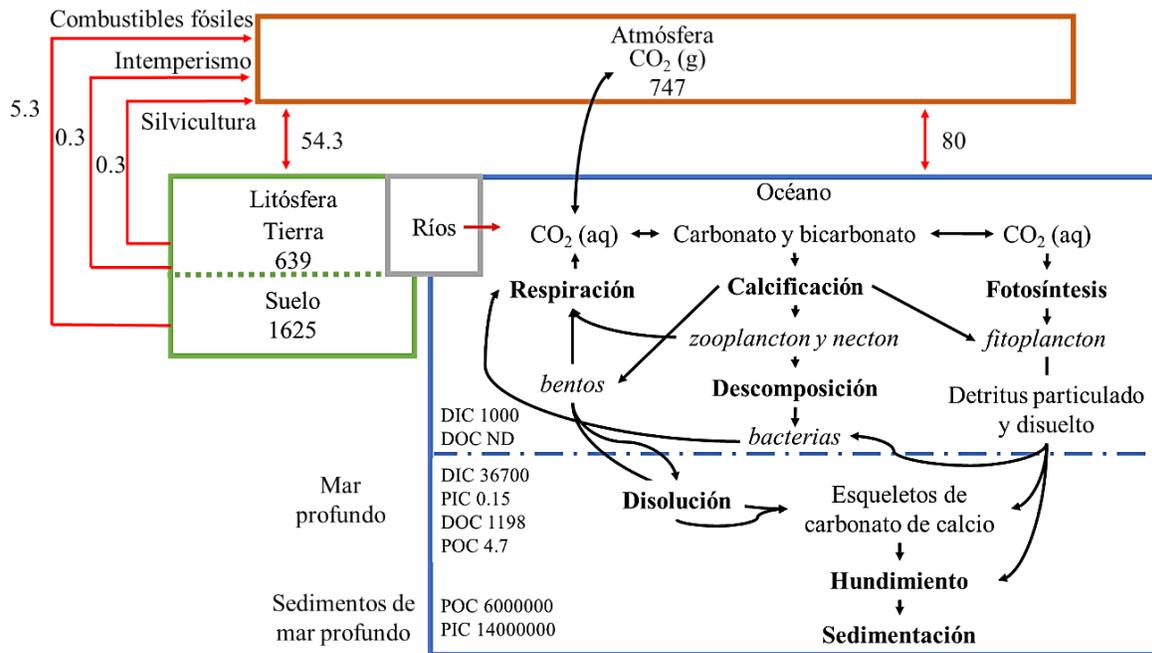


Figura 1.1. Ciclo global del carbono. Las cantidades de carbono en los reservorios se presentan en Gt y los flujos en Gt/año. DIC: carbono inorgánico disuelto, PIC: carbono inorgánico particulado, DOC: carbono orgánico disuelto, POC: carbono orgánico particulado. No se dispone de una estimación de DOC en agua superficial (modificado de Lalli y Parsons (2013) y Millero (2013)).

Los océanos tienen un papel muy importante en el ciclo del carbono; por una parte, la interfaz atmósfera-océano permite un intercambio de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, la materia orgánica en los sedimentos marinos da origen a un reservorio de carbonatos que, durante escalas de tiempo muy largas (del orden de 500 Ma), da lugar al ciclo del carbono geológico, donde el carbono contenido en los sedimentos nuevamente se convierte en CO<sub>2</sub> a través de la consolidación de sedimentos en rocas sedimentarias que pasan por procesos metamórficos y de subducción. En este proceso se libera el CO<sub>2</sub> mediante ventilas hidrotermales o actividad volcánica (Libes, 2009; Millero, 2013; Raven *et al.*, 2005).

### 1.1.1. Parámetros del sistema de carbonatos en el océano

El sistema de carbonatos oceánico se describe a través de las siguientes variables: alcalinidad total (A<sub>T</sub>), carbono inorgánico disuelto (DIC, por sus siglas en inglés), potencial de hidrógeno (pH), presión parcial de dióxido de carbono (pCO<sub>2</sub>), concentración de iones bicarbonato ([HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]) y la concentración de iones carbonato ([CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]) (Foster, 2008).

A<sub>T</sub>: Es una medida de la concentración de las bases que pueden aceptar un protón cuando el agua de mar se titula hasta un pH de 4.0. La alcalinidad total de una muestra de agua de mar se estima mediante la titulación usando un ácido, como puede ser el ácido clorhídrico (Dickson, 2010; Millero, 2013). Para el agua superficial en océano abierto se define como:

$$A_T \approx [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad [1.1]$$

DIC: Está presente en el océano en tres formas inorgánicas principalmente: como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (>85%), CO<sub>2</sub> acuoso y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. En menor cantidad, también se encuentra como ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Dado que cada una de estas moléculas contiene un átomo de carbono (Dickson, 2010; Libes, 2009; Zeebe, 2012), la concentración total de DIC está dada por:

$$\text{DIC} = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad [1.2]$$

pCO<sub>2</sub>: Los gases presentes en la atmósfera ejercen una presión conocida como presión parcial (Millero, 2013). La pCO<sub>2</sub> en el aire en equilibrio con una muestra de agua (a una temperatura específica) es una medida del grado de saturación de una muestra con CO<sub>2</sub> gaseoso. La pCO<sub>2</sub> es una función dependiente de la temperatura y cambia aproximadamente 4.2% por Kelvin.

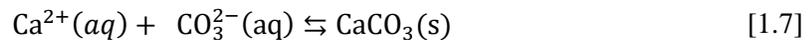
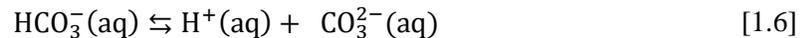
pH: Es una unidad adimensional que mide el grado de acidez del agua, manifestado en la concentración de iones de hidrógeno ([H<sup>+</sup>]) que contiene en moles por litro. El pH se mide en la escala logarítmica, por lo que cuando disminuye en una unidad, la acidez o [H<sup>+</sup>], se multiplica por 10. El pH de una muestra de agua de mar cambia con la presión y la temperatura (Dickson, 2010; IPCC, 2014; Raven *et al.*, 2005). El pH se define como:

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+] \quad [1.3]$$

$A_T$  y DIC se expresan en moles por kilogramo de disolución y son cantidades conservativas, es decir que no se ven afectadas por cambios en la presión o la temperatura, por lo que son variables muy útiles en los modelos del ciclo del carbono oceánico (Zeebe, 2012). Junto con  $pCO_2$  y pH, estas variables se pueden determinar analíticamente.

### 1.1.2. Sistema de carbonatos

El ciclo del carbono inorgánico del océano comienza con la disolución del  $CO_2$  atmosférico en la superficie del océano (Ecuación 1.4), el cual se vuelve un gas reactivo y forma parte de las reacciones que dan origen al sistema de carbonatos (Dickson, 2010; Millero, 2013; Raven *et al.*, 2005), las cuales son:



El intercambio gaseoso entre la atmósfera y el océano genera una condición de equilibrio entre el  $CO_2$  de la superficie marina y el atmosférico en escalas próximas al año (Dickson, 2010; Doney *et al.*, 2009). El  $CO_2$  disuelto reacciona con el agua de mar para formar  $H^+$  y  $H_2CO_3$  (Ecuación 1.5). El ácido carbónico se disocia y libera un  $H^+$  (Ecuación 1.6), lo que provoca, por un lado, el aumento de la acidez y, en consecuencia, la disminución del pH y de la concentración del ion carbonato. Finalmente, se da la formación de minerales de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) (Ecuación 1.7) usados por la biota marina como plancton, corales, algas coralinas y otros invertebrados, los cuales dependen de la cantidad de carbonatos disueltos en el agua (Doney *et al.*, 2009; Raven *et al.*, 2005).

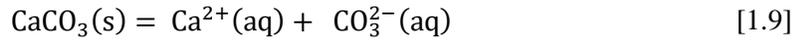
### 1.1.3. Estados de saturación

La tasa de disolución de carbonato de calcio es igual a su tasa de precipitación cuando las especies están en equilibrio. Cuando no se puede disolver más  $CaCO_3$  se considera que la disolución está saturada (Dickson, 2010; Libes, 2009). El producto de solubilidad del carbonato de calcio se define como:

$$k_{CaCO_3} = [Ca^{2+}]_{saturado} \times [CO_3^{2-}]_{saturado} \quad [1.8]$$

Este equilibrio se ve afectado por el aumento de  $CO_2$  disuelto que provoca una disminución de  $CO_3^{2-}$ , por lo que la reacción se desplaza hacia la derecha, impide la formación de minerales carbonatados y favorece su disolución. La disolución de minerales carbonatados tiende a disminuir la concentración de  $H^+$  y por lo tanto, a incrementar el pH (Ecuación 1.9) (Libes, 2009; Raven *et al.*, 2005)

← Formación de minerales



Disolución →

Los minerales de  $\text{CaCO}_3$  que se crean dentro del sistema de carbonatos son la aragonita, la calcita y calcita de magnesio. La calcita y la aragonita son polimorfos del carbonato de calcio. La aragonita tiene una simetría ortorrómbica, la cual es menos estable que la calcita (Figura 1.2). Por otro lado la simetría trigonal de la calcita ocasiona que esta sea más estable, por lo que la solubilidad de la aragonita es 1.5 veces menor que la de la calcita a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  (Dickson, 2010; Millero, 2013; Raven *et al.*, 2005).

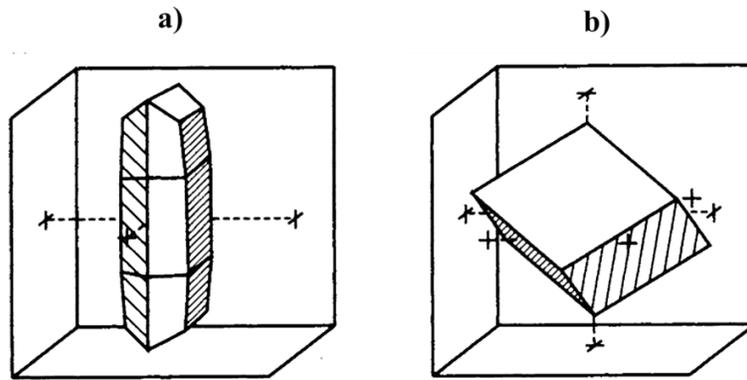


Figura 1.2. Formas cristalinas de a) aragonita y b) calcita. Se indican los ejes de simetría mediante las líneas punteadas (recuperado de Libes, 2009).

Dado que las masas de agua no se encuentran en equilibrio con respecto a la calcita y a la aragonita, se emplea el estado de saturación ( $\Omega$ ) que es el grado al cual una masa de agua se desvía del equilibrio de  $\text{CaCO}_3$  para un cierto mineral (Libes, 2009) y se define como:

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{observado}} \times [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{observado}}}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{saturado}} \times [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{saturado}}} = \frac{\text{Producto iónico observado}}{k_{\text{CaCO}_3}} \quad [1.10]$$

Cuando  $\Omega = 1$  la disolución o masa de agua está en equilibrio químico con la fase mineral en una condición saturada;  $\Omega > 1$  indica que la masa de agua está supersaturada con respecto a un mineral de  $\text{CaCO}_3$  y que precipitará de forma espontánea hasta que las concentraciones de iones disminuyan a niveles de saturación. Cuando  $\Omega < 1$  la masa de agua está subsaturada y, si llegase a existir  $\text{CaCO}_3$ , se disolvería espontáneamente hasta que el producto iónico se eleve a un valor de saturación apropiado (Dickson, 2010; Libes, 2009).

Actualmente la superficie de los océanos se encuentra supersaturada con respecto a la calcita y aragonita biogénicas. Los valores de  $\Omega$  son mayores en zonas tropicales y menores en las zonas de

altas latitudes, ya que  $\Omega$  varía de 6.0 en bajas latitudes a 2.5 en altas latitudes (Doney *et al.*, 2009; Libes, 2009). Respecto a la columna de agua,  $\Omega$  tiende a disminuir a mayores profundidades. El estado de saturación disminuye con la profundidad porque la solubilidad de la calcita y aragonita biogénicas incrementa con altas presiones, por la disminución de la temperatura y porque el  $\text{CO}_3^{2-}$  es retirado del agua marina por la acción de la remineralización microbiana. A una cierta profundidad, conocida como profundidad de compensación del  $\text{CaCO}_3$ , la tasa que llega de carbono inorgánico es igual a su tasa de disolución y los sedimentos que se encuentran por debajo de ella contienen muy poco carbonato de calcio (< 10%) (Libes, 2009; Millero, 2013).

## 1.2. Cambios del pH en el pasado

El pH juega un papel importante dentro del sistema de carbonatos debido a que gobierna la partición del carbono entre DIC y  $\text{CO}_2$  atmosférico y determina la profundidad de la zona de compensación de carbonatos. También influye tanto en el ciclo de los iones mayores presentes en el océano, uno de ellos es el boro, como en el ciclo de elementos menores como el fósforo, silicio, nitrógeno (Doney *et al.*, 2009; Halevy y Bachan, 2017; Palmer *et al.*, 1998). A pesar de su importancia, el registro geológico del pH es escaso lo cual dificulta conocer las causas concretas de las respuestas del sistema de carbonatos y de los organismos a eventos globales de la variación del  $\text{CO}_2$  y del pH (Halevy y Bachan, 2017; Hönisch *et al.*, 2012).

Para conocer las variaciones del pH del océano se utiliza como indicador el isótopo de boro ( $\delta^{11}\text{B}$ ), útil para eventos que hayan ocurrido durante el Neógeno y el Cuaternario. Se encuentra en el  $\text{CaCO}_3$  marino de organismos tales como foraminíferos, pterópodos, corales y ostrácodos (Anagnostou *et al.*, 2016; Clarkson *et al.*, 2015; Foster y Rae, 2016; Halevy y Bachan, 2017). En ocasiones también es necesario conocer otros parámetros como la  $A_T$ , el DIC (Anagnostou *et al.*, 2016; Sostdian *et al.*, 2018) o el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera (Millero, 2013).

Durante los últimos 400,000 años, el pH superficial del océano ha oscilado entre 8.0 y 8.3 (Millero, 2013) y se ha mantenido constante desde el Mioceno (Tabla 1.1). Dentro de los eventos que provocan los mayores cambios en el pH se pueden identificar los ciclos interglaciares, los periodos de aumento rápido de temperatura y las extinciones masivas. Cabe destacar que la  $p\text{CO}_2$  no ha regresado a valores tan altos como los del Cretácico, durante el cual el clima de la Tierra fue uno de los más cálidos de su historia. En este periodo había bosques tropicales en los polos, los arrecifes de coral crecían hasta  $15^\circ$  de latitud más cerca de los polos que en la actualidad y el nivel del mar era hasta 200 m más alto. Las causas del clima mundial cálido del Cretácico se deben a los altos niveles de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, presentes probablemente por i) una tasa extraordinariamente elevada de actividad volcánica que intensificó el efecto invernadero (Tarbuck *et al.*, 2005) y ii) por el impacto de un asteroide en el planeta, el cual causó una elevada vaporización de depósitos de yeso, provocó lluvia ácida que disminuyó el pH del océano y causó una extinción masiva (Hönisch *et al.*, 2012).

En el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, la temperatura global aumentó  $> 5^\circ\text{C}$  a lo largo de 10,000 años, de forma conjunta con la liberación masiva de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera (Pelejero *et al.*, 2010), por lo que se registraron valores altos de  $p\text{CO}_2$  y bajos de pH,  $\Omega_a$  disminuyó de 3 a 1.5 y tuvo lugar la mayor extinción de foraminíferos béticos de mar profundo (Hönisch *et al.*, 2012; Pelejero *et al.*, 2010). En el Plioceno aumentó la temperatura superficial del océano ( $\sim 2.5^\circ\text{C}$  más que la actual) con valores de  $p\text{CO}_2$  atmosférico entre 200–400 ppm y un pH oceánico superficial  $\sim 0.06$  a 0.11 unidades

menor que el valor registrado en la era preindustrial, cuyo inicio se contempla desde 1750 (IPCC, 2014). En el Plioceno, los foraminíferos planctónicos migraron hacia los polos, aunque no se tiene evidencia de un cambio significativo en las tasas de calcificación (Dowsett y Robinson, 2008; Hönisch *et al.*, 2012).

Tabla 1.1. Valores reportados del pH superficial del océano y de pCO<sub>2</sub> atmosférico desde el periodo Cretácico hasta el Cuaternario.

Era	Periodo	Época	Edad (Ma)	pH	pCO <sub>2</sub> (ppm)	Referencia	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0.0117	8.2	~280	IPCC, 2014 Hoegh-Guldberg <i>et al.</i> , 2007	
		Pleistoceno	2.58	~8.1 a ~8.3	~180 a ~300	Zeebe, 2012 Sosdian <i>et al.</i> , 2018	
	Neógeno	Plioceno	5.33	~8.0 a ~8.3	~330 a ~400	Hönisch <i>et al.</i> , 2012 Zeebe, 2012	
		Mioceno	23.03	~8.1		Sosdian <i>et al.</i> , 2018	
	Paleógeno	Oligoceno		33.9	7.88 ± 0.05	~550	Sosdian <i>et al.</i> , 2018 Anagnostou <i>et al.</i> , 2016
			Eoceno	56.0	~7.6 a ~7.8	~1000 a ~1400	Sosdian <i>et al.</i> , 2018 Anagnostou <i>et al.</i> , 2016
Paleoceno		66.0	~7.8 a ~7.9	~1000	Demicco <i>et al.</i> , 2015 Hönisch <i>et al.</i> , 2012		
Mesozoico	Cretácico		72.1	~7.9 a ~7.7	~1100	Hönisch <i>et al.</i> , 2012	

De manera general las condiciones de la superficie del océano en los periodos de glaciación se caracterizan por bajas temperaturas, valores altos de pH y una alta concentración de carbonatos, mientras que la pCO<sub>2</sub> atmosférica es menor durante periodos de glaciación y mayor durante desglaciaciones (Millero, 2013; Zeebe, 2012). Un ejemplo de ello es la última desglaciación que ocurrió al final del Pleistoceno. Se ha documentado que durante este tiempo el CO<sub>2</sub> atmosférico

aumentó de 189 a 265 ppm ( $\approx 30\%$ ), el pH superficial disminuyó en  $0.15 \pm 0.05$  unidades (Hönisch *et al.*, 2012), pero el pH y el  $\text{CaCO}_3$  de mar profundo permanecieron constantes (Zeebe, 2012).

A diferencia de las épocas anteriores, el Holoceno se había caracterizado hasta antes de la industrialización por presentar condiciones muy estables tanto en la atmósfera como en el océano, de acuerdo con los registros de núcleos de hielo y por los indicadores del ion carbonato del mar profundo. La química del sistema de carbonatos era casi constante dado que el pH superficial había variado menos de  $\sim 0.004$  unidades y  $\Omega_{\text{calcita}}$  menos de  $\sim 10\%$  durante los últimos 10,000 años (Zeebe, 2012).

### 1.3. Cambio global y climático

El cambio global incluye las alteraciones en la constitución y funcionamiento de los distintos sistemas de la Tierra debidos a la actividad del ser humano: biósfera, atmósfera, hidrósfera y litósfera (Zamora *et al.*, 2015). La temperatura global (terrestre y oceánica) del planeta ha aumentado  $0.85^\circ\text{C}$  de 1880 a 2012, lo que ha desencadenado cambios en el clima global: derretimiento acelerado de glaciares, pérdida de nieve en zonas continentales, disminución de la superficie del hielo marino del Ártico (del 3.5% al 4.1% por decenio desde 1979 a 2012), alteraciones en los patrones de lluvia (aumento de 1% a 3% por  $^\circ\text{C}$ ) e incremento del nivel del mar ( $\sim 3$  cm por década, resultando en un aumento global de 8 cm desde 1990) (IPCC, 2014; Wuebbles *et al.*, 2017).

El forzamiento radiativo es uno de los mayores factores que subyace al cambio climático. Es un cambio que provoca un desequilibrio en el presupuesto de energía radiativa del sistema climático que resulta ya sea por causas o impulsores naturales o antropogénicos (Fahey *et al.*, 2017). El presupuesto se caracteriza por estar en un estado cercano al equilibrio entre la absorción de ondas cortas y la emisión de ondas largas (Collins *et al.*, 2006). El forzamiento radiativo puede provocar cambios de temperatura o de otros parámetros (Collins *et al.*, 2006; Fahey *et al.*, 2017).

Entre los principales impulsores del cambio climático están aquellos generados por la actividad antropogénica desde la era industrial, superpuestos a la variabilidad climática natural como las variaciones en la irradiación solar, erupciones volcánicas y el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), además de los impulsores naturales a gran escala como los ciclos de Milankovitch y la fluctuación de  $\text{CO}_2$  atmosférico debido al ciclo geológico de carbono (Fahey *et al.*, 2017).

Los impulsores antropogénicos se dividen en los gases de efecto invernadero bien mezclados (GEIBM), los forzadores climáticos de corta duración (que incluyen metano, algunos hidrofluorocarbonos, ozono, aerosoles, entre otros), el vapor de agua y los cambios en el albedo. Los GEIBM se caracterizan por circular y mezclarse de forma homogénea en la tropósfera. Algunos ejemplos de GEIBM incluyen al  $\text{CO}_2$ , óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), halocarbonos y metano (algunos GEIBM también se consideran como forzadores climáticos de corta duración) (Fahey *et al.*, 2017). Los GEIBM incrementan la absorción de la radiación al planeta (Collins *et al.*, 2006) y pueden permanecer en la atmósfera desde una década hasta más de un siglo; además estos gases tienen variabilidades que pueden ser desde muy pequeñas hasta ser regionales (Fahey *et al.*, 2017). De ellos, el  $\text{CO}_2$  es producido en mayores cantidades debido a la quema de combustibles fósiles (como carbón, gas y petróleo), a los cambios de uso de suelo y a los procesos industriales (Fahey *et al.*, 2017). El  $\text{CO}_2$  ha contribuido en un 78% de las emisiones de GEIBM de 1970 a 2010; entre 1750 y 2011, las emisiones antropogénicas de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera acumuladas fueron de  $2,040 \pm 310$   $\text{GtCO}_2$ , del cual

un ~40% ha permanecido en la atmósfera, mientras que ~30% fue almacenado en la biósfera y en el océano (Rhein *et al.*, 2013).

### 1.3.1. Efectos en el océano

De acuerdo con el reporte del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (2014), cuatro variables oceánicas han incrementado globalmente desde la década de 1950: i) el inventario de CO<sub>2</sub> antropogénico, ii) el nivel del mar, iii) el contenido de calor de la superficie del océano y iv) la diferencia salinidad entre regiones de alta y baja salinidad. Al almacenar y transportar grandes cantidades de calor, agua y carbono, el océano tiene una gran influencia en el clima. Desde 1970 la Tierra ha absorbido más energía que la que emite al espacio, almacenando ese exceso principalmente en el océano y en menor medida en la atmósfera y en los continentes. Debido al cambio climático, se ha registrado que de 1971 a 2010 la superficie del océano ha absorbido la mayor cantidad de la energía (64%), seguido del derretimiento de glaciares (3%), el calentamiento de los continentes (3%) y de la atmósfera (1%). Dado que el océano tiene una alta capacidad calorífica y una lenta circulación, se requiere de más de una década para que la temperatura de la superficie oceánica se ajuste a los cambios actuales, entre los cuales se encuentran los efectos causados por el aumento de emisiones de GEIBM, lo que conlleva una alteración en las propiedades físicas y químicas del océano.

A escala global, el calentamiento del océano es mayor en la superficie. Los primeros 75 m se han calentado ~0.11°C por decenio de 1971–2010 (IPCC, 2014; Rhein *et al.*, 2013). A mayor temperatura, incrementa la estratificación del océano, esto provoca que disminuya la cantidad de nutrientes disponibles para los organismos fotosintéticos. También se reduce la solubilidad del oxígeno así como su intercambio entre la atmósfera y el océano, lo que propicia zonas con bajos niveles de oxígeno (Henson *et al.*, 2016).

## 1.4. Acidificación oceánica

Se ha estimado que la pCO<sub>2</sub> en la atmósfera y el océano ha aumentado, mientras que el pH y [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] han disminuido. La pCO<sub>2</sub> superficial del océano ha incrementado más rápido que la atmosférica en algunos sitios, lo que implica una disminución del consumo de CO<sub>2</sub> atmosférico por el posible aumento de temperatura en esas regiones, cambios en la intensidad de la producción biológica o cambios en condiciones físicas, como por ejemplo entre condiciones de El Niño o La Niña (Rhein *et al.*, 2013).

Desde el comienzo de la era industrial, la liberación de carbono proveniente de actividades antropogénicas ha aumentado la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico aproximadamente de 280 ppm a 415 ppm en mayo de 2019. Los océanos han absorbido aproximadamente 155 PgC de la atmósfera en los últimos dos siglos y medio (Rhein *et al.*, 2013). Mediante este proceso se han reducido los niveles de gases de efecto invernadero y se han disminuido los impactos del calentamiento global (Rhein *et al.*, 2013). En cambio, la alta absorción de CO<sub>2</sub> por parte del océano ha provocado su acidificación (Doney *et al.*, 2009; Feely *et al.*, 2009; Raven *et al.*, 2005; Zeebe, 2012).

La acidificación oceánica se refiere a la disminución del pH del océano, de  $[\text{CO}_3^{2-}]$  y de los estados de saturación de aragonita y calcita, durante un periodo largo de tiempo (décadas o más), causada principalmente por la disolución del  $\text{CO}_2$  atmosférico en el océano (Figura 1.3). La acidificación oceánica puede ocurrir de forma natural por procesos como el incremento de la actividad volcánica, la liberación de hidratos de metano, cambios a largo plazo en la respiración neta o inducido por humanos como la liberación rápida de GEIBM a la atmósfera (Doney *et al.*, 2009; Feely *et al.*, 2009; Jewett y Romanou, 2017; Orr *et al.*, 2005; Rhein *et al.*, 2013).

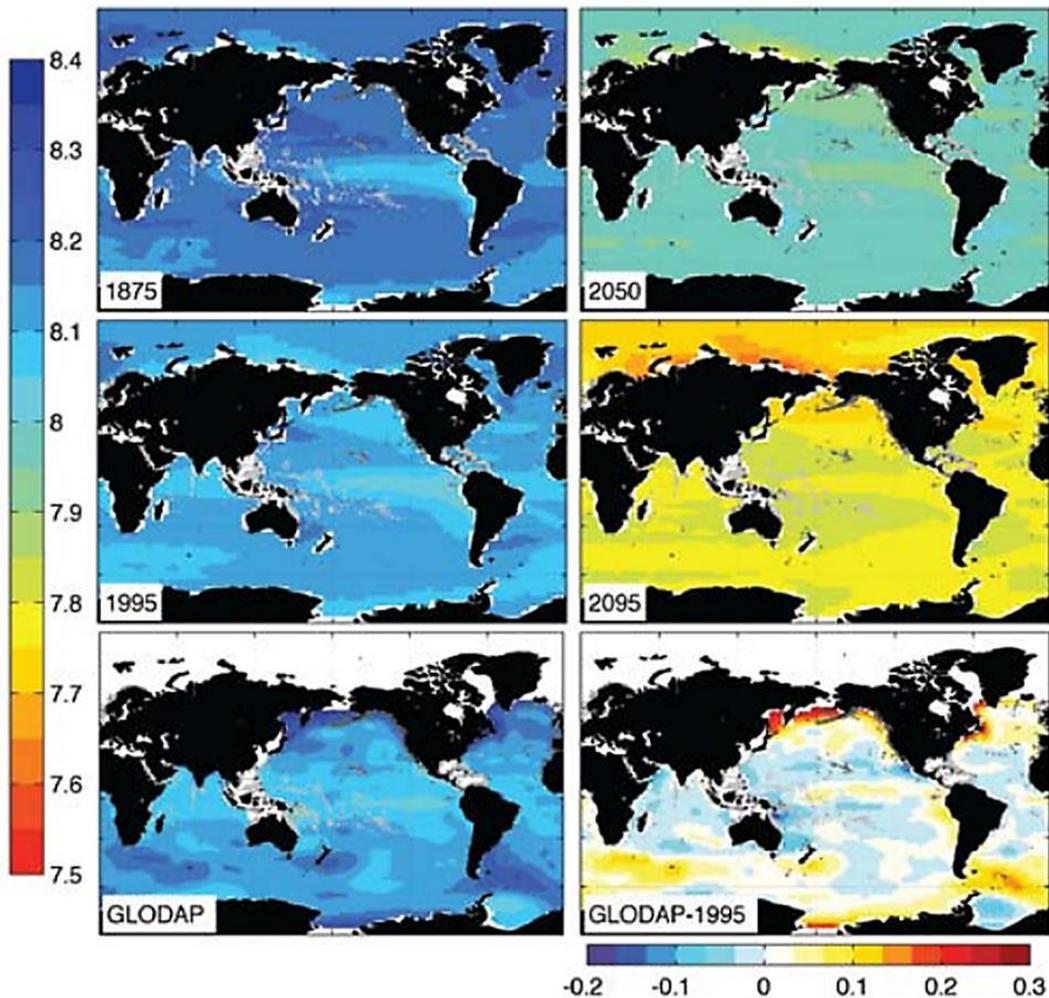


Figura 1.3. Media decadal de pH en la superficie oceánica centrada alrededor de los años 1785, 1995, 2050, 2095 resultado del Modelo 3.1 del Centro Nacional de Investigación Atmosférica para la Comunidad del Sistema Climático (filas superior y media). Fila inferior: pH de la superficie oceánica resultado del Proyecto Análisis de Datos del Océano Global (GLODAP, por sus siglas en inglés). pH de 1995 de GLODAP (esquina inferior izquierda) en 1995 (esquina inferior derecha). Las áreas en blanco no contienen datos (recuperado de Feely *et al.*, 2009).

Se ha reportado que el pH del océano superficial ha disminuido en 0.1 unidades, de 8.2 a 8.1, lo que corresponde a un aumento de 26% de la acidez, medida como  $[H^+]$  (IPCC, 2014), con una disminución de  $\sim 0.0018$  al año (Feely *et al.*, 2009). Algunas estimaciones indican que a mediados de este siglo los niveles de  $CO_2$  atmosférico podrían ser de 500 ppm y a finales del siglo podrían exceder las 800 ppm, por lo que el pH superficial en promedio podría ser menor de lo que ha sido durante más de 50 Ma, ya que disminuiría de 0.3–0.4 unidades, con un incremento del 100–150% de  $[H^+]$  (Figura 1.3) (Feely *et al.*, 2009; Orr *et al.*, 2005; Rhein *et al.*, 2013).

#### 1.4.1. Variación latitudinal

La química del carbono está influenciada por la temperatura del agua, debido a que la solubilidad del  $CO_2$  en el océano incrementa con la disminución de la temperatura. Por lo tanto, en latitudes altas, el agua superficial del océano puede retener más  $CO_2$  que en latitudes bajas. Además, los minerales carbonatados se disuelven con mayor facilidad en zonas frías, lo que causa subsaturación del carbonato de calcio (Jewett y Romanou, 2017). Estas zonas son sumideros de  $CO_2$  ( $pCO_2 < 365$  ppm) mientras que las zonas de afloramientos son una fuente de  $CO_2$  ( $pCO_2 > 365$  ppm) (Millero, 2013). En general, en el ecuador los valores de  $pCO_2$  son más altos y los de pH son menores debido a las surgencias ecuatoriales (Millero, 2013).

#### 1.4.2. Variación estacional

El pH y la  $pCO_2$  dependen en gran medida del estado de la cadena trófica, en especial de los procesos fotosintéticos que varían en función de la temperatura, estacionalidad, latitud y otros procesos físicos. En las zonas polares y subpolares con altas cantidades de nutrientes, el pH es menor en el invierno debido a las surgencias e incrementa en el verano por la intensa actividad fotosintética. En los océanos subpolares el pH es menor en meses cálidos (pH de  $\sim 8.05$ ) y presenta un incremento en meses fríos (pH de  $\sim 8.15$ ), con un cambio del 25% de  $[H^+]$  (Takahashi *et al.*, 2014). En las zonas costeras, durante los meses de verano en general la  $pCO_2$  es menor a 1000  $\mu atm$ , mientras que regiones expuestas a condiciones eutróficas extremas la  $pCO_2$  puede llegar a ser  $> 3000 \mu atm$  y el pH menor a 7.0. En invierno, los florecimientos algales incrementan el pH y el oxígeno disuelto en las zonas costeras (Wallace *et al.*, 2014).

#### 1.4.3. Acidificación en la columna de agua

En la columna de agua el pH se mantiene casi constante (8.2 a 8.3) en los primeros 100 m superficiales. El pH disminuye de 7.7 a 7.5 entre los 200 m y los 1,200 m de profundidad, que coinciden con las zonas de oxígeno mínimo, originadas por la oxidación bioquímica de materia orgánica, incluyendo la respiración de los organismos. Cerca de los 4,000 m de profundidad, el pH se eleva a  $\sim 7.9$  (Park, 1966).

El sistema de carbonatos cambia en la parte superficial del océano por los procesos físicos de gran escala, que incluyen la disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico y el ascenso hacia la superficie de agua naturalmente acidificada debido a la mezcla vertical y a las surgencias o afloramientos locales (Jewett y Romanou, 2017). El pH del agua superficial en océano abierto varía de 7.95–8.35 (en promedio 8.11),  $[\text{CO}_3^{2-}]$  de 80–300  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $\Omega_{\text{aragonita}}$  varía de 2.4–3.9 y  $\Omega_{\text{calcita}}$  de 3.8–5.9. En la zona superficial, el pH alcanza sus valores máximos por la pérdida de  $\text{CO}_2$  debido a los procesos de fotosíntesis (Feely *et al.*, 2009; Millero, 2013).

En el mar profundo, el efecto de la presión de la columna de agua provoca el aumento de los valores de disolución de  $\text{CaCO}_3$ . Este efecto provoca que antes de los 4,000 m de profundidad se presente un valor de pH máximo (Millero, 2013; Park, 1966). El agua de mar profundo está enriquecida en  $\text{CO}_2$  debido i) a la última toma de carbono antropogénico ocurrida cuando estuvo en contacto con la atmósfera, ii) a los procesos de respiración y iii) al limitado intercambio gaseoso con la atmósfera (Jewett y Romanou, 2017).

#### 1.4.4. Acidificación en zonas costeras

La acidificación costera generalmente exhibe una variabilidad de alta frecuencia y eventos cortos. El agua de zonas costeras está influenciada por: la absorción de  $\text{CO}_2$  atmosférico, afloramientos, surgencias, la entrada de agua dulce, de sulfuros, nitrógeno y otros nutrientes (Jewett y Romanou, 2017; Wallace *et al.*, 2014). Los afloramientos suben las masas de agua de mar profundo a la superficie, lo que provoca eventos de acidificación en la zona superficial del océano cerca de zonas costeras, de la plataforma continental y del océano abierto, donde se han registrado valores de  $\Omega_a$  de 1.0 y de pH de 7.75 (Feely *et al.*, 2008). Debido a la combinación de estos procesos, se ha detectado una disminución de pH y de  $\text{pCO}_2$  de forma estacional, aunque también se ha reportado que algunas zonas costeras experimentan la disminución de pH durante las últimas décadas (Wallace *et al.*, 2014).

La entrada de agua dulce que proviene de ríos y estuarios cambian la química del océano, volviéndolo más susceptible a la acidificación por los cambios en la  $A_T$ , de DIC, nutrientes y de carbono orgánico disuelto y particulado. Una mayor cantidad de nutrientes promueve la producción de materia orgánica autótrofa dando origen a los florecimientos fitoplanctónicos, donde existe una alta producción de oxígeno, un alto consumo de  $\text{CO}_2$  y un aumento en el pH. Al morir los organismos autótrofos, son consumidos por bacterias u otros organismos heterótrofos que aumentan la producción de  $\text{CO}_2$  y el consumo de oxígeno, lo que resulta en eventos de acidificación (Gledhill *et al.*, 2015; Jewett y Romanou, 2017; Wallace *et al.*, 2014). Los estuarios tienden a ser los ecosistemas costeros con mayor afectación, debido a las altas cantidades de contaminantes y procesos naturales que concentran las sustancias en los sedimentos y en la gran cantidad de organismos que lo habitan (Libes, 2009).

#### 1.4.5. Variación por océanos

Los valores de pH y  $\text{CO}_3^{2-}$  son mayores en regiones altamente productivas como el oeste del Océano Atlántico Norte y Sur, del Pacífico Norte y Sur, del Mar de Bering, el Océano Indico Sur y del Océano del Sur (Tabla 1.2) (Feely *et al.*, 2009). En cambio, el Océano Pacífico registra los valores más bajos

y el horizonte de  $\Omega_{\text{aragonita}}$  más somero (Feely *et al.*, 2008). Algunas áreas de la superficie del océano actúan como fuentes de  $\text{CO}_2$  atmosférico, como las zonas oceánicas ecuatoriales, otras actúan como sumideros, como el océano Atlántico Norte, donde la combinación de aguas superficiales frías y fuertes vientos favorecen la formación de aguas profundas y la captura de  $\text{CO}_2$ . Cuando el agua que sube de las surgencias o de afloramientos entra a la capa de mezcla, aumenta su temperatura, disminuye la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , del  $\text{CO}_2$  y también disminuye la capacidad del agua de disolver más  $\text{CO}_2$ , por lo que en estas zonas se libera  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. La mayor área de desgasificación es la Zona Ecuatorial del Océano Pacífico (ZEOP), seguida de los Océanos Atlántico e Índico (Libes, 2009). Los mayores flujos de desgasificación en la ZEOP ocurren en el verano y otoño, durante periodos de ENOS el cual debilita a los vientos alisios y genera temperaturas superficiales inusualmente altas (Feely *et al.*, 2004).

Respecto a la disolución de calcita y aragonita en los océanos, los perfiles de profundidad muestran que algunas partes del este del Océano Atlántico subtropical se vuelven insaturadas con respecto a la aragonita entre los 400–1,000 m. Por debajo de los 3,000–5,000 m el Océano Atlántico se vuelve insaturado con respecto a la calcita. En los océanos Índico y Pacífico, la insaturación de aragonita comienza antes, entre los 100–1,200 m, donde los valores de  $\text{CO}_3^{2-}$  disminuyen debajo de los  $66 \mu\text{mol kg}^{-1}$ . La adición de  $\text{CO}_2$  antropogénico ha ocasionado que los horizontes de saturación de calcita se desplacen hacia la superficie, variando entre los 50 y 200 m de profundidad. Las proyecciones indican que para el 2050 el Océano Ártico estará insaturado respecto a la aragonita, lo mismo ocurrirá en el 2095 para el Océano del Sur y partes del Pacífico Norte (Feely *et al.*, 2009).

Tabla 1.2. Valores promedio de parámetros oceanográficos globales (Feely *et al.*, 2009).

Océano	pH	S	T (°C)	$\Omega_a$	$\Omega_c$
Ártico	$8.231 \pm 0.06$	$34.639 \pm 0.53$	$4.35 \pm 3.0$	$2.41 \pm 0.3$	$3.82 \pm 0.4$
Atlántico Norte	$8.125 \pm 0.06$	$35.643 \pm 1.37$	$19.56 \pm 7.3$	$3.47 \pm 0.6$	$5.31 \pm 0.8$
Atlántico Sur	$8.102 \pm 0.03$	$36.022 \pm 0.79$	$22.54 \pm 3.7$	$3.70 \pm 0.4$	$5.63 \pm 0.5$
Índico Norte	$8.068 \pm 0.03$	$34.722 \pm 1.57$	$28.12 \pm 0.8$	$3.94 \pm 0.2$	$5.93 \pm 0.3$
Índico Sur	$8.092 \pm 0.03$	$35.103 \pm 0.47$	$23.46 \pm 4.3$	$3.59 \pm 0.4$	$5.46 \pm 0.5$
Pacífico Norte	$8.105 \pm 0.06$	$34.051 \pm 0.86$	$20.81 \pm 8.1$	$3.30 \pm 0.7$	$5.04 \pm 0.9$
Pacífico Sur	$8.079 \pm 0.03$	$35.287 \pm 0.55$	$23.29 \pm 4.3$	$3.52 \pm 0.4$	$5.36 \pm 0.6$
Del Sur	$8.102 \pm 0.04$	$34.775 \pm 0.84$	$16.74 \pm 10.5$	$3.02 \pm 0.9$	$4.64 \pm 1.3$

#### 1.4.6. Acidificación en el Mar Caribe

El Mar Caribe es el mar marginal más grande del Océano Atlántico (área =  $2.52 \times 10^6$  km<sup>2</sup>). Está limitado al noreste por las Antillas y al sur por las costas de Venezuela, Colombia y Panamá; su profundidad promedio es de 2,200 m (Maul, 1996), el agua es oligotrófica, posee una extensa plataforma de carbonato y arrecifes de coral en el Arco de las Antillas, Puerto Rico, Jamaica, Cuba, las Bahamas y en México (Gledhill *et al.*, 2008).

La concentración de CO<sub>2</sub> en la superficie del Mar Caribe es muy cercana al equilibrio con la atmósfera pero exhibe variaciones estacionales ( $\pm 10$ – $20$  ppm), con pequeñas variaciones en la temperatura superficial del océano (Foster, 2008). De invierno a primavera ocurre la mayor toma de CO<sub>2</sub> en el Mar Caribe (de  $-0.04$  a  $-1.2$  mol/m<sup>2</sup>año), lo que contribuye de un 0.04% a 1% de la toma global del océano con una estimación de 1.6 PgC/año (Wanninkhof *et al.*, 2007). El  $\Omega_a$  anual ha disminuido de 4.05 a 3.90 ( $\pm 0.08$ ) a una tasa de  $-0.012$   $\Omega_a$  por año de 1996 a 2006 como consecuencia del aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico (Gledhill *et al.*, 2008). En la Tabla 1.3 se muestran los resultados de algunos estudios en el Mar Caribe que han reportado valores del sistema de carbonatos para evaluar el impacto de la acidificación oceánica sobre los arrecifes de coral, de los cuales 2/3 partes están amenazados por actividades humanas (sobrepoblación, pesca excesiva, desarrollo costero, contaminación, entre otras) (Gledhill *et al.*, 2008).

Tabla 1.3. Valores promedio de parámetros oceanográficos del Mar Caribe. ND: no disponible.

Región	pH	pCO <sub>2</sub> (ppm)	Temperatura (°C)	Salinidad	Referencia
Belice / Honduras	8.17	266	38.3	35.5	Foster, 2008
México	8.34	ND	27.74	35.71	Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983
Puerto Rico	$8.05 \pm 0.02$	$408 \pm 38$	$27.8 \pm 0.3$	$35.5 \pm 0.28$	Gray <i>et al.</i> , 2012
Venezuela	7.61	ND	28.64	37.07	Cisneros y Barrientos, 2008

### 1.5. Impactos biológicos de la acidificación oceánica

La acidificación oceánica ha provocado la reducción de las tasas de calcificación para una gran variedad de organismos calcificadores como moluscos, crustáceos, equinodermos, corales, algas calcáreas, foraminíferos y cocolitofóridos, incluso si los estados de saturación de calcita y aragonita son  $> 1$  (Libes, 2009; Orr *et al.*, 2005; Raven *et al.*, 2005). La acidificación oceánica puede interrumpir los procesos fisiológicos sensibles al pH, tales como el intercambio gaseoso celular. A un

pH menor, también se altera la química de los nutrientes y la forma química de los metales en el océano, los cuales pueden mejorar su rol como micronutrientes (como el hierro) o aumentar su potencial tóxico (como el cobre o el zinc). En una mayor escala, los cambios en los organismos desembocan en perturbaciones en las redes tróficas ya que la distribución de las especies puede variar con el cambio de la profundidad de la zona de compensación de carbonatos. De igual forma la pérdida de calcificadores en los arrecifes de coral provocarían la merma de cuantiosas especies que dependen de este ecosistema, los cuales podrían ser afectados también por los procesos costeros, lo que implica importantes consecuencias en el ciclo del carbono (Pelejero *et al.*, 2010).

Otros impactos importantes sobre los organismos son aquellos en su reproducción. La mayoría de los organismos marinos tienen etapas larvales que duran desde días a varios meses, durante las cuales los organismos son especialmente sensibles a los cambios físicos y químicos del ambiente. Al encontrarse en un medio ligeramente más ácido, disminuye la fertilización, se dañan las estructuras de esqueletos y conchas de las larvas, se reduce el éxito de eclosión de los huevos, el crecimiento larvario, su posterior establecimiento y crecimiento en el fondo marino. El incremento de la  $p\text{CO}_2$  también afecta la capacidad de regulación de pH de las células y tejidos, cuyas consecuencias se reflejan en el transporte de iones, la actividad enzimática y la estructura de las proteínas. Además impacta en la cantidad de oxígeno que reciben los tejidos, lo que afecta en gran medida a las especies con altas tasas metabólicas (Pelejero *et al.*, 2010). Estos efectos son menos predecibles y más difíciles de detectar (Raven *et al.*, 2005).

Aunque el grado de sensibilidad varía entre especies, algunos taxones han mostrado una mejora en su calcificación (Wood *et al.*, 2008). La pérdida masiva de organismos calcificadores podría provocar el aumento de la absorción oceánica de  $\text{CO}_2$  por i) el aumento de la capacidad del océano para tomar  $\text{CO}_2$  antropogénico debido al menor consumo de la capacidad de amortiguamiento del océano llevado a cabo por los organismos y ii) el incremento de la alcalinidad debido a la mayor cantidad de  $[\text{CO}_3^{2-}]$  disponible, ya que si las reacciones de equilibrio controlan la especiación del carbono inorgánico, la fracción de  $\text{HCO}_3^-$  debería aumentar la cantidad de  $\text{CO}_2$  que se puede disolver en el océano (Libes, 2009).

### 1.5.1. Organismos planctónicos

Los organismos planctónicos son aquellos que no pueden moverse en contra de las corrientes oceánicas y que se transportan en la zona pelágica de forma relativamente pasiva debido a sus dimensiones microscópicas (de  $0.02 \mu\text{m}$  a  $200 \mu\text{m}$ ). Existen dos tipos de organismos planctónicos dependiendo si son autótrofos (fitoplancton) o heterótrofos (zooplancton) (Lalli y Parsons, 2013).

El fitoplancton convierte el  $\text{CO}_2$  disuelto en carbono orgánico y provee de más del 99% de la materia orgánica que se utiliza en las redes tróficas marinas. La vasta mayoría se encuentra en la superficie de los océanos y fija aproximadamente 50 Gt de carbono al año (Raven *et al.*, 2005). Los principales organismos calcificadores del fitoplancton son los cocolitofóridos, que precipitan placas calcáreas llamadas cocolitos. Debido a la acidificación oceánica han presentado malformaciones y disminución de la calcificación, de acuerdo con estudios realizados con las especies *Emiliania huxleyi*, probablemente la especie más estudiada en el océano junto con *Gephyrocapsa oceanica* (Figura 1.4), que disminuyeron su calcificación de  $-25\%$  a  $-66\%$  cuando la  $p\text{CO}_2$  se incrementó de 560 a 840  $\mu\text{atm}$  (Doney *et al.*, 2009; Lalli y Parsons, 2013; Riebesell *et al.*, 2000).

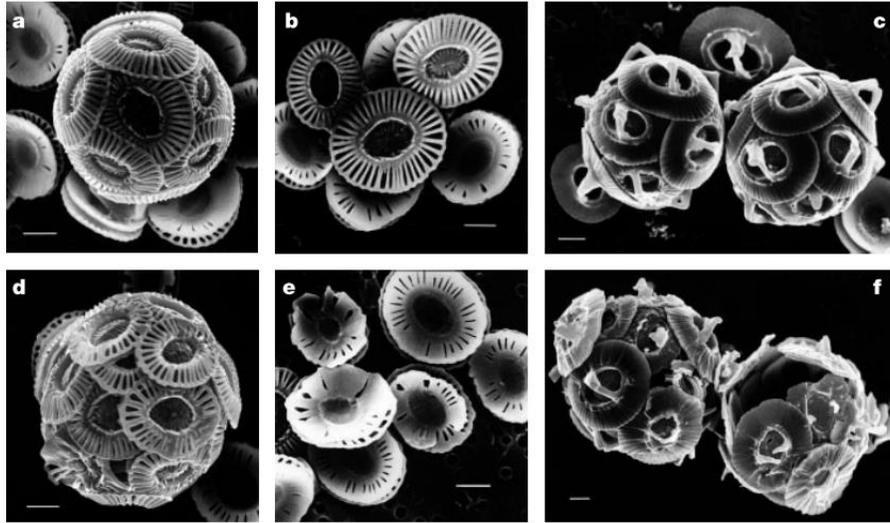


Figura 1.4. Fotografías de microscopía electrónica de barrido en diferentes concentraciones de  $\text{CO}_2$ . *Emiliana huxleyi*: a, b, d, e; *Gephyrocapsa oceanica*: c, g (recuperado de Riebesell *et al.*, 2000).

En cuanto al zooplancton, los grupos calcificadores más abundantes son los pterópodos euthecosomados y los foraminíferos planctónicos. Los pterópodos euthecosomados poseen un caparazón externo fino y son los mayores productores planctónicos de aragonita. Sus densidades de población son altas en zonas polares y subpolares dentro de los primeros 300 m superficiales. En estas zonas se ha especulado que  $\Omega_{\text{aragonita}} < 1$  a finales del siglo XXI y es probable que los pterópodos no sean capaces de adaptarse lo suficientemente rápido al cambio. Como consecuencia de ello, sus rangos de distribución se reducirían en la columna de agua y se desplazarían a las zonas superficiales de bajas latitudes. Si los pterópodos se ven excluidos de las latitudes altas, sus depredadores como el salmón, la caballa, el arenque, el bacalao y la ballena barbada también se verían afectados (Lalli y Parsons, 2013; Orr *et al.*, 2005; Pelejero *et al.*, 2010; Raven *et al.*, 2005). Los foraminíferos tienen un caparazón calcáreo perforado, o testa, que está compuesto por una serie de cámaras. Los experimentos que se han realizado muestran que la masa de su concha disminuye con la baja de  $[\text{CO}_3^{2-}]$  y que al estar expuestos a 560–740 ppmv de  $\text{CO}_2$ , en *Orbitulina universa* y *Globigerinoides sacculifer* disminuyen su abundancia entre 4–8% y 6–14%, respectivamente (Doney *et al.*, 2009).

### 1.5.2. Organismos bentónicos

Los organismos bentónicos viven asociados al fondo del mar, incluyendo a las algas que se fijan al sustrato, animales sésiles como esponjas, corales y percebes y animales que se arrastran o se entierran en el sedimento. Los invertebrados bentónicos secretan  $\text{CaCO}_3$  en forma de aragonita, calcita, calcita alta en magnesio,  $\text{CaCO}_3$  amorfo o mezclas entre estas fases. El  $\text{CaCO}_3$  amorfo es el menos estable de todas ellas, seguida por la calcita de magnesio (Fabry *et al.*, 2008; Lalli y Parsons, 2013).

Entre los productores de carbonato más importantes se encuentran los corales escleractínidos que se desarrollan en zonas cálidas, someras, con aguas cristalinas y elevada salinidad (Doney *et al.*, 2009;

Kleypas *et al.*, 1999; Maul, 1996). Las zooxantelas que están en simbiosis con los corales, las algas sésiles y los pastos marinos son considerados los principales productores primarios bentónicos, los cuales producen 1 Gt de carbono por año (Raven *et al.*, 2005). Estudios experimentales han demostrado que los corales se han visto afectados tanto por la alta tasa de erosión (>90% que la tasa de calcificación) como por la acidificación oceánica dado que, mediante el cálculo del sistema de carbonatos, con un valor de CO<sub>2</sub> atmosférico de 560 ppm, se obtuvo que su calcificación y su crecimiento disminuyen en un 40% (Kleypas y Langdon, 2006). Además estudios en campo han confirmado que la acreción de CaCO<sub>3</sub> es negativa o igual a cero con  $\Omega_{\text{aragonita}} = 3.3$ , cuando el CO<sub>2</sub> es cercano a 480 ppm y [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] es menor a 200  $\mu\text{mol/kg}$  (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Kleypas y Langdon, 2006) lo que provoca que sus estructuras sean muy débiles, se quiebren y se disuelvan. Evidencias recientes sugieren que la cobertura coralina en los arrecifes tropicales ha disminuido entre 30–50% desde 1980 (Pelejero *et al.*, 2010).

De los organismos heterótrofos bentónicos, los equinodermos son especialmente sensibles a la acidificación oceánica. Las larvas y el esqueleto de algunos adultos son de calcita de magnesio, por lo que el medio ácido del océano podría inhibir la formación de estos minerales. Asimismo, los crustáceos son un grupo vulnerable por su dependencia a la disponibilidad de calcio y bicarbonato para formar su exoesqueleto después de mudar de piel (Raven *et al.*, 2005). Otros organismos calcificadores bentónicos son los bivalvos, las ostras y las almejas, las cuales tienen un alto valor comercial para la pesca (Fabry *et al.*, 2008). El principal problema que enfrentan es la alta pérdida de la movilidad de su esperma (40%) en el medio marino cuando el pH se disminuye experimentalmente de 8 a 6 unidades, condiciones que están fuera de los cambios proyectados que se esperan para el año 2300 (Raven *et al.*, 2005).

## 1.6. Justificación

El presente trabajo forma parte del proyecto “Observatorios costeros y registros ambientales de la acidificación de los mares mexicanos”, el cual propone obtener datos de pH del océano para cumplir con el Objetivo del Milenio 14 “Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y sus efectos.”, meta 14.3. “Minimizar y afrontar los impactos de la acidificación marina, incluyendo una mejor cooperación científica a todos los niveles”, indicador 14.3.1 “Acidez marina (pH) media medida en un conjunto acordado de estaciones de muestreo representativa” de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Con este objetivo se plantea obtener información global que se pueda comparar en los diferentes ámbitos estadísticos, calcular conjuntos regionales y globales así como proveer de datos y metadatos al Departamento Estadístico de las Naciones Unidas. El indicador es de gran importancia para estudiar la variabilidad de la acidificación oceánica en localidades que proveen de importantes servicios oceánicos. Para ello es necesario que los sitios de muestreo cuenten con i) una medida de frecuencia adecuada para describir la variabilidad y tendencia de la química de los carbonatos y ii) datos de la suficiente calidad para integrarlos con otras mediciones de un país o región (Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2018; United Nations, 2015).

## 1.7. Objetivos

### 1.7.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo fue estudiar el comportamiento del pH y del ciclo de carbono inorgánico en el arrecife coralino de Puerto Morelos, Quintana Roo, durante dos años.

### 1.7.2. Objetivos particulares

- a. Obtener y calificar una serie de datos de pH del periodo del 31 de agosto de 2016 al 01 de julio de 2018.
- b. Obtener datos *in situ* de pCO<sub>2</sub>, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto del Mar Caribe mexicano.
- c. Estimar los estados de saturación del carbonato de calcio (de calcita y aragonita) durante el periodo de estudio.

## 2. Área de estudio

El observatorio costero del Cambio Global de Puerto Morelos se localiza en la costa del Mar Caribe mexicano (Figura 2.1) en el municipio Puerto Morelos del estado de Quintana Roo (20°50' N, 86°52' O). Está constituido por cinco estaciones de muestreo donde se monitorean diversas variables físico-químicas del agua de mar dentro y fuera de la laguna arrecifal (Tabla 2.1).

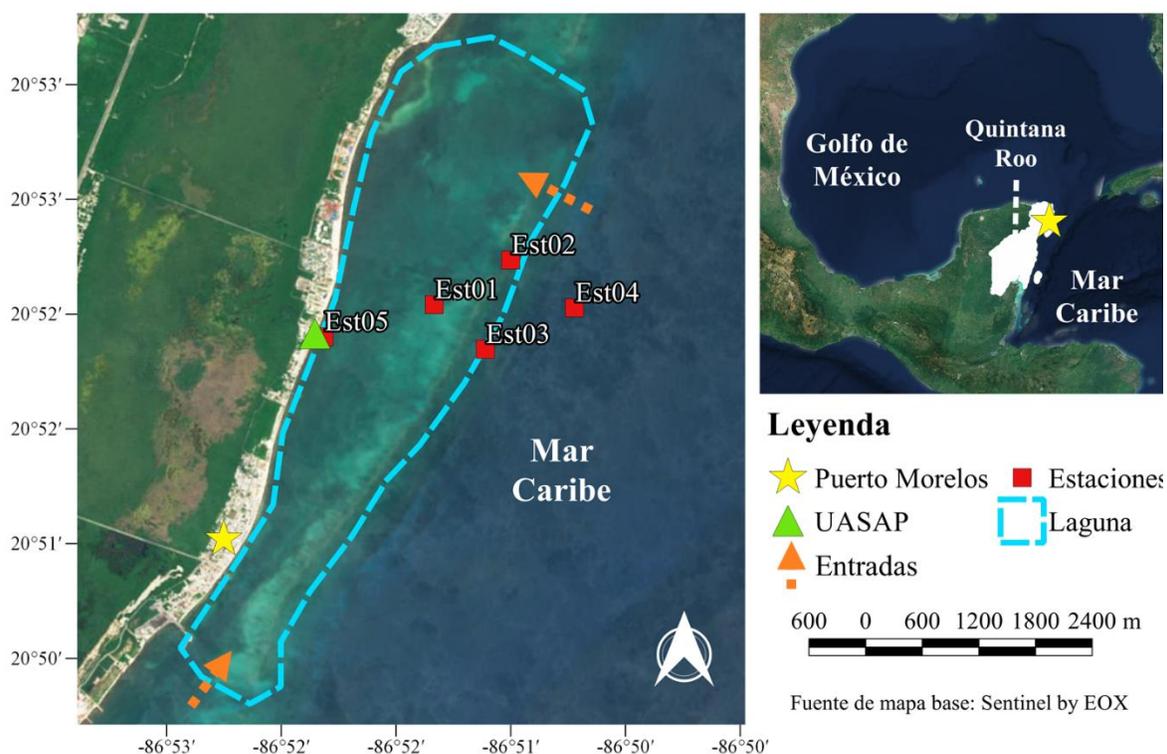


Figura 2. 1. Mapa de la zona de estudio y posiciones de las estaciones del Observatorio Costero de Puerto Morelos.

Tabla 2.1. Estaciones del observatorio costero de Puerto Morelos que registran datos marinos in situ: C: conductividad, T: temperatura, OD: oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>: presión parcial de CO<sub>2</sub>.

Estación	Longitud (O)	Latitud (N)	Parámetros registrados
01	86°51'24.04"	20°52'15.71"	C, OD, pH, T
02	86°51'0.66"	20°52'29.97"	pCO <sub>2</sub> , C, OD, pH, T
03	86°51'8.53"	20°52'1.74"	T
04	86°50'40.50"	20°52'14.86"	T
05	86°52'0.65"	20°52'5.06"	T

## 2.1. Geología

La Península de Yucatán es una plataforma carbonatada parcialmente emergida con una extensa plataforma continental cuya base está constituida por caliza, dolomita y anhidrita. Por encima se encuentra un sistema de acuíferos rodeado de rocas altamente permeables, las cuales están cubiertas por rocas carbonatadas y sedimentos distribuidos a lo largo de la costa (Perry *et al.*, 2003). La plataforma disminuye hasta prácticamente desaparecer al sur de Puerto Morelos (Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). Las zonas con rocas altamente permeables se encuentran sobre fallas que sirven como canales para el movimiento del agua subterránea (Perry *et al.*, 2003).

Debido a la alta permeabilidad de la plataforma, en la parte este de la Península de Yucatán no se presentan corrientes permanentes significativas (Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983; Perry *et al.*, 2003); en cambio, existen manantiales submarinos, que ocurren de forma natural a causa de la disolución de las rocas carbonatadas, proceso conocido como karstificación (Perry *et al.*, 2003). En la costa de la Península de Yucatán ocurre la descarga de agua subterránea, la cual puede ser agua dulce o salina (Hernández-Terrones *et al.*, 2011; Null *et al.*, 2014). Los cuerpos de agua subterránea están altamente expuestos a la contaminación por infiltraciones de aguas negras o rellenos sanitarios, los cuales son muy comunes en Quintana Roo (Null *et al.*, 2014).

## 2.2. Meteorología

El clima es tipo Aw1(x')(i')g, es decir, clima cálido con temperatura media mayor a los 22°C, subhúmedo de poca oscilación térmica (entre 5 a 7 °C) con lluvias en verano y el mes más caliente del año se presenta antes de junio (Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). Cuenta con dos temporadas dominantes que se definen por los patrones de viento y la temperatura atmosférica. El invierno comienza en noviembre y descienden a la península masas de aire continental desde América del Norte por el Golfo de México, creando vientos conocidos como “nortes” (Coronado *et al.*, 2007; Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). La precipitación en Puerto Morelos es alta en verano ya que su promedio anual es aproximadamente de 1,100 mm (Elizondo, 2012; Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). Puerto Morelos recibe una gran cantidad de tormentas tropicales y huracanes que se presentan principalmente de mayo a octubre (Secaira Fajardo *et al.*, 2017).

## 2.3. Oceanografía

La corriente Norecuatorial atraviesa el Océano Atlántico hasta llegar a las Antillas menores, donde se divide en las Corrientes de las Antillas y de Guyana. Esta última corriente entra al Caribe como la Corriente del Caribe, la cual al atravesar el Canal de Yucatán, pasa a ser la Corriente de Yucatán (Figura 2.2) (Merino Ibarra, 1992; Suárez-Morales y Rivera Arriaga, 1998). A partir de Cabo Catoche la corriente cambia de dirección hacia el noroeste donde se alinea con el borde de la plataforma continental y después su núcleo se separa del borde en el interior del Golfo de México, donde se genera la Corriente del Lazo (Merino Ibarra, 1992). La corriente de Yucatán tiene una gran influencia

en el ambiente de Puerto Morelos (Coronado *et al.*, 2007) y de ella dependen los patrones hidrodinámicos estacionales (Suárez-Morales y Rivera Arriaga, 1998).

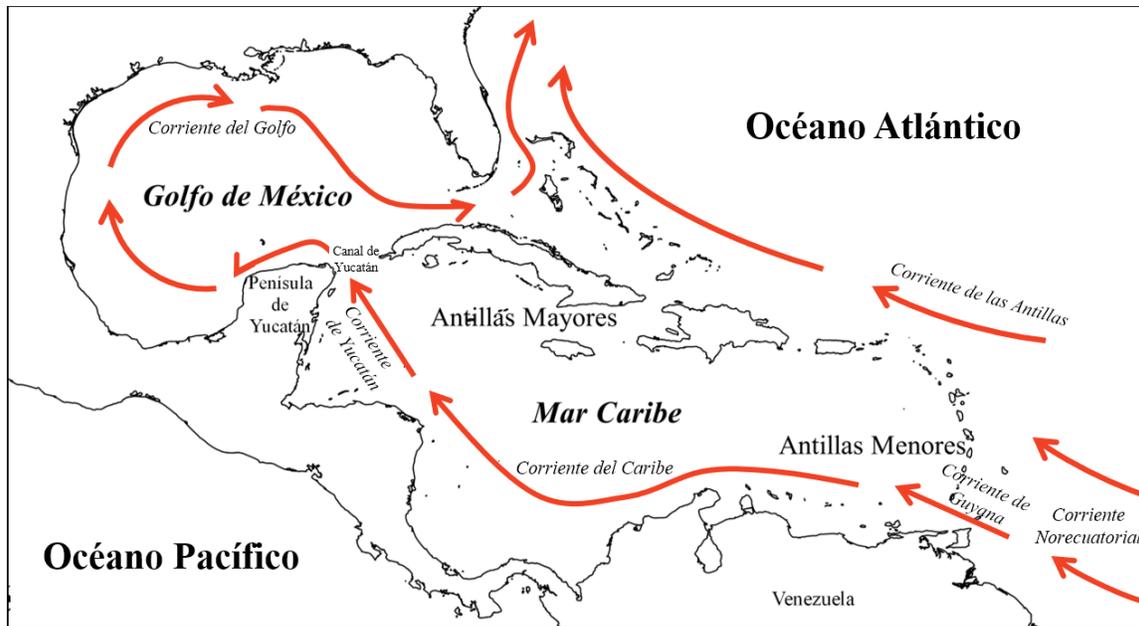


Figura 2.2. Corrientes marinas en la zona del Mar Caribe.

### 2.3.1. Arrecife de Puerto Morelos

Frente a Puerto Morelos se encuentra el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, que forma parte del Arrecife Mesoamericano. El arrecife es de barrera de tipo bordeante con 21 km de largo (Ortiz *et al.*, 2017) por lo que se le considera el segundo arrecife más largo del mundo (González *et al.*, 2017). En la zona costera se han identificado cuatro zonas estructurales: laguna arrecifal, arrecife posterior, cresta arrecifal y arrecife frontal (Jordan *et al.*, 1981). Los arrecifes de coral se encuentran entre los ecosistemas más productivos y diversos del planeta con una fauna asociada que incluye isópodos, anfípodos, anélidos, poliquetos, anémonas, esponjas, moluscos, crustáceos y peces; también se presenta una gran diversidad de algas que participan en la producción primaria del ecosistema o en la construcción del arrecife (Romeu, 1995).

Los arrecifes de coral proveen de distintos servicios ecosistémicos: i) de regulación, ya que son una protección natural contra el oleaje, tormentas y huracanes (González *et al.*, 2017; Secaira Fajardo *et al.*, 2017); ii) de aprovisionamiento, pues los usos que se le dan a las especies obtenidas del arrecife en la región son farmacéuticos, ornamentales y alimenticios así como iii) culturales, ya que actualmente el turismo es la principal actividad económica de la zona (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010). En los arrecifes del Caribe Mexicano se ha reportado una biodiversidad marina que incluye más de 20 especies de esponjas, más de 80 de corales (Romeu, 1995), 393 de peces arrecifales (Schmitter-Soto *et al.*, 2000) y 546 especies de macroalgas (Cetz-Navarro *et al.*, 2008).

### 2.3.2. Laguna arrecifal

La laguna arrecifal tiene 4 km de largo, un ancho que varía de 550 a 1,500 m y su profundidad media es de 3 a 4 m, con un máximo de 8 m. La temperatura que se ha reportado en el fondo de la laguna varía de 31–32°C entre mediados de agosto e inicios de septiembre a 24–25°C entre diciembre y marzo (Coronado *et al.*, 2007). La laguna presenta poco movimiento de agua, con una velocidad promedio de 10 cm/s hacia el norte, una altura de olas menor a 1m y un tiempo de residencia promedio de hasta 2 semanas en condiciones calmadas. Durante periodos de clima extremo, por ejemplo ante un huracán de categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson, cuando el oleaje es muy fuerte, se pueden presentar olas de hasta 6 m, lo que provoca que el tiempo de residencia disminuya a 21 minutos (Coronado *et al.*, 2007).

La laguna se conecta al mar mediante dos entradas: una al norte, a través de un hueco en la cresta arrecifal de 300 m de ancho y 6 m de profundidad, otra al sur, de 400 m de ancho y aproximadamente 8 m de profundidad, donde acaba la cresta arrecifal y existen bancos arrecifales aislados (Coronado *et al.*, 2007; Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). Las ondas superficiales rompen sobre la cresta arrecifal donde generan un flujo de agua unidireccional hacia el interior de la laguna, el cual depende de la altura de la ola y del nivel del mar. Este flujo inducido por las olas se acumula en la laguna y aumenta su nivel. En consecuencia, este aumento causa que el exceso de agua fluya por ambas bocas con una dirección preferencial hacia el exterior de la laguna a una velocidad promedio aproximada de 20 cm/s en condiciones normales. Además de este flujo unidireccional, la velocidad de la corriente en el interior de la laguna depende de las corrientes mareales, las corrientes generadas por el viento y la inducida por la corriente de Yucatán.

El fondo de la laguna está cubierto por arena calcárea estabilizada por pastos marinos, donde la especie dominante es *Thalassia testudinum*. En ciertas zonas de pavimento calcáreo se encuentran comunidades coralinas o sedimentos carbonatados no consolidados (Coronado *et al.*, 2007; Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983; Piñón Gimete, 1998).

### 3. Metodología

#### 3.1. Fuentes de datos

Los datos que se utilizaron en el presente trabajo forman parte del proyecto “Observatorios Costeros del Cambio Global”. Los sensores fueron colocados por M. en C. Edgar Escalante Mancera y M. en I. Miguel Ángel Gómez Reali en cinco estaciones frente a Puerto Morelos. Los datos se descargaron de los sensores de forma manual en varias ocasiones y se guardaron en sistemas de almacenamiento de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos (UASAP). Posteriormente, se enviaron a la Unidad Informática Marina y al Laboratorio Cambio Global y Climático del Instituto de Ciencias del Mar de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se utilizaron los datos de oxígeno disuelto (OD), presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>), pH, temperatura y salinidad registrados cada 30 minutos con sensores situados en las estaciones 01 y 02 del observatorio costero de Puerto Morelos. Los sensores se encuentran a una profundidad de 5 m. El periodo de estudio fue de mayo de 2016 a julio de 2018, con la mayor cantidad de datos aceptados de septiembre de 2016 a diciembre de 2017. El periodo elegido para estudiar el sistema de carbonatos fue el mes de septiembre de 2016.

##### 3.1.1. Sensor *SeaFET*

El sensor *SeaFET Ocean pH Sensor* mide el pH de ambientes marinos en un intervalo de 6.5 a 9 en la escala de pH, con una resolución de 0.0001 y exactitud nominal de 0.05. La medida se realiza a través de dos celdas potenciométricas, una interna y una externa (Figura 3.1), que usan un transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET, por sus siglas en inglés) como electrodo de trabajo. La celda interna mide el potencial de la unión líquida usando como electrodo de referencia una disolución saturada de KCl, mientras que el potencial del electrodo de referencia de la celda externa varía con la concentración de cloruro del medio, que se puede obtener a partir de la salinidad. Cada celda registra valores de pH (pH interior y pH exterior) que en condiciones normales son similares. Se utilizaron dos sensores *SeaFET* (designados como *SeaFET-323* y *SeaFET-357*) los cuales fueron proporcionados por el Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza. Los valores que se utilizaron en este trabajo fueron los de la celda externa, pues la sonda interna mostró deriva.

Para obtener el valor de pH de la celda interna (pH<sub>int</sub>), se utiliza la Ecuación 3.1:

$$\text{pH}_{\text{int}} = \frac{V_{\text{FETINT}} - k_{0i} - k_{2i} \times T}{S_{\text{nerst}}} \quad [3.1]$$

donde

$$S_{\text{nerst}} = \frac{R \times T \times \ln(10)}{F} \quad [3.2]$$

donde  $V_{FETINT}$  es el voltaje medido en la celda interna en voltios (V),  $k_{0i}$  y  $k_{2i}$  son coeficientes de calibración de la celda interna,  $T$  es la temperatura en K,  $R$  es la constante de los gases ideales (8.31447 J/Kmol) y  $F$  es la constante de Faraday (96485.3415 C/mol).

Los valores de pH de la celda externa ( $pH_{ext}$ ) son sensibles a la actividad del cloruro y se calculan con la Ecuación 3.3:

$$pH_{ext} = \frac{V_{FETEXT} - k_{0e} - k_{2e} \times T}{S_{nerst}} + \log(Cl_T) + 2 \log(\gamma_{HCl}) - \log\left(1 + \frac{S_T}{K_S}\right) \quad [3.3]$$

donde  $V_{FETEXT}$  es el voltaje medido en la celda externa en voltios (V),  $\gamma_{HCl}$  es el coeficiente de actividad del HCl,  $S_T$  es la cantidad total de sulfato disuelto en el agua,  $K_S$  es la constante de disociación de  $HSO_4^{4-}$  y  $Cl_T$  es el cloruro total del agua marina el cual se obtiene con la salinidad ( $S$ ) mediante la Ecuación 3.4:

$$Cl_T = \frac{0.99889}{35.453} \times \frac{S}{1.80655} \quad [3.4]$$

El logaritmo del coeficiente de actividad de HCl ( $\gamma_{HCl}$ ) se obtiene con la Ecuación 3.5:

$$\log(\gamma_{HCl}) = \frac{-A_{DH} \times \sqrt{I}}{1 + 1.394 \times \sqrt{I}} + (0.08885 - 0.000111 \times t) \times I \quad [3.5]$$

donde  $A_{DH}$  es la constante de actividad de HCl de Debye-Huckel (Ecuación 3.6),  $I$  es la fuerza iónica (Ecuación 3.7) y  $t$  es la temperatura en °C.

$$A_{DH} = 0.00000343 \times t^2 + 0.00067524 \times t + 0.49172143 \quad [3.6]$$

$$I = \frac{19.924 \times S}{1000 - 1.005 \times S} \quad [3.7]$$

El sulfato total disuelto en el agua marina se calcula con la Ecuación 3.8:

$$S_T = \frac{0.1400}{96.062} \times \frac{S}{1.80655} \quad [3.8]$$

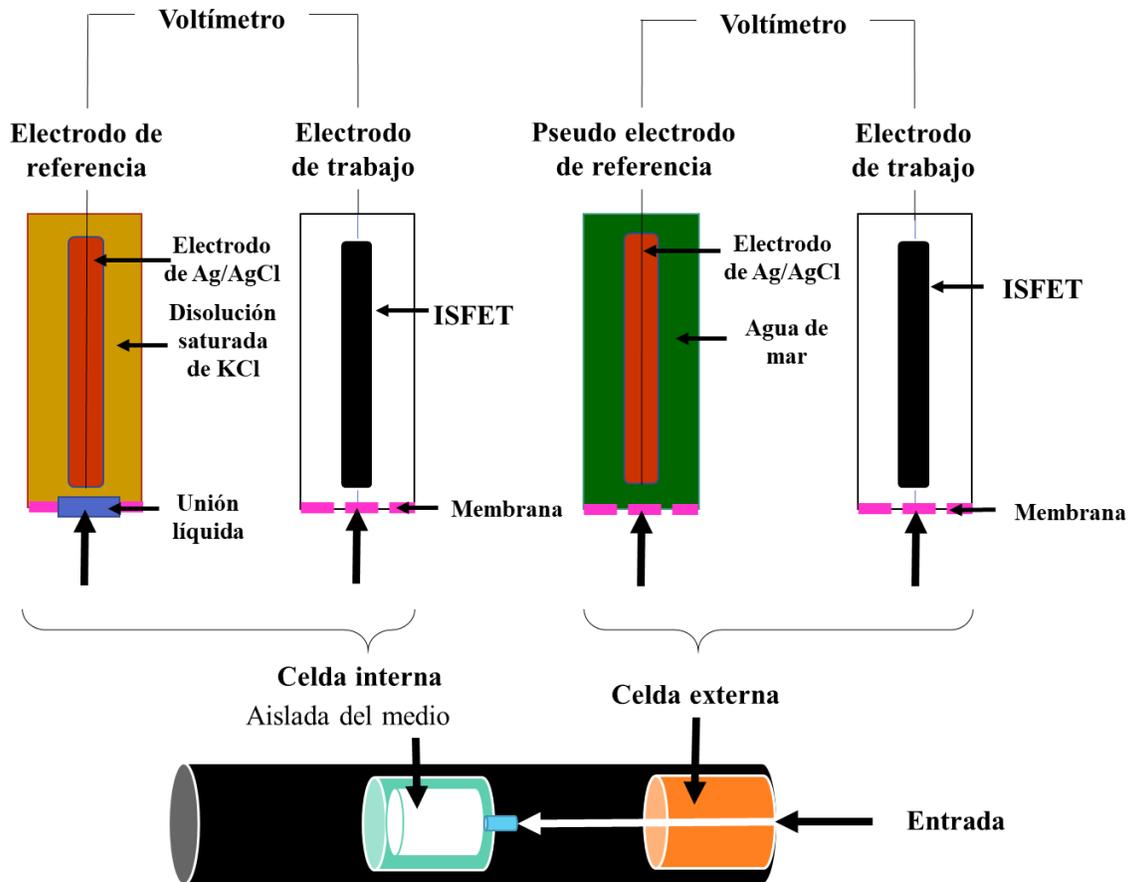


Figura 3. 1. Diagrama del funcionamiento del sensor SeaFET Ocean pH.

### 3.1.2. Datos de pCO<sub>2</sub>

El sensor *Pro-Oceanus Digital Mini CO<sub>2</sub>* proporciona medidas *in situ* de pCO<sub>2</sub>, del cual se obtuvieron la fracción molar de CO<sub>2</sub> (xCO<sub>2</sub>), la presión y la temperatura. Opera con un detector infrarrojo no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés) para obtener la xCO<sub>2</sub> húmeda del gas que se obtiene de la xCO<sub>2</sub> gaseosa (Figura 3.2). El instrumento proporciona la xCO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm). Para obtener pCO<sub>2</sub> en microatmósferas (µatm) se utilizó la Ecuación 3.9:

$$p\text{CO}_2 = x(\text{CO}_2) \times P \quad [3.9]$$

donde xCO<sub>2</sub> es la fracción molar del CO<sub>2</sub> en su fase gaseosa medida en ppm y P es la presión medida en micro atmósferas. El intervalo operativo es de 0–1000 ppm, con una resolución de 1 ppm (0.1 %) y su exactitud es de ±20 ppm (2%). En el observatorio costero se encuentran situados dos sensores de pCO<sub>2</sub> designados como *Mini CO<sub>2</sub>* 292 y 293.

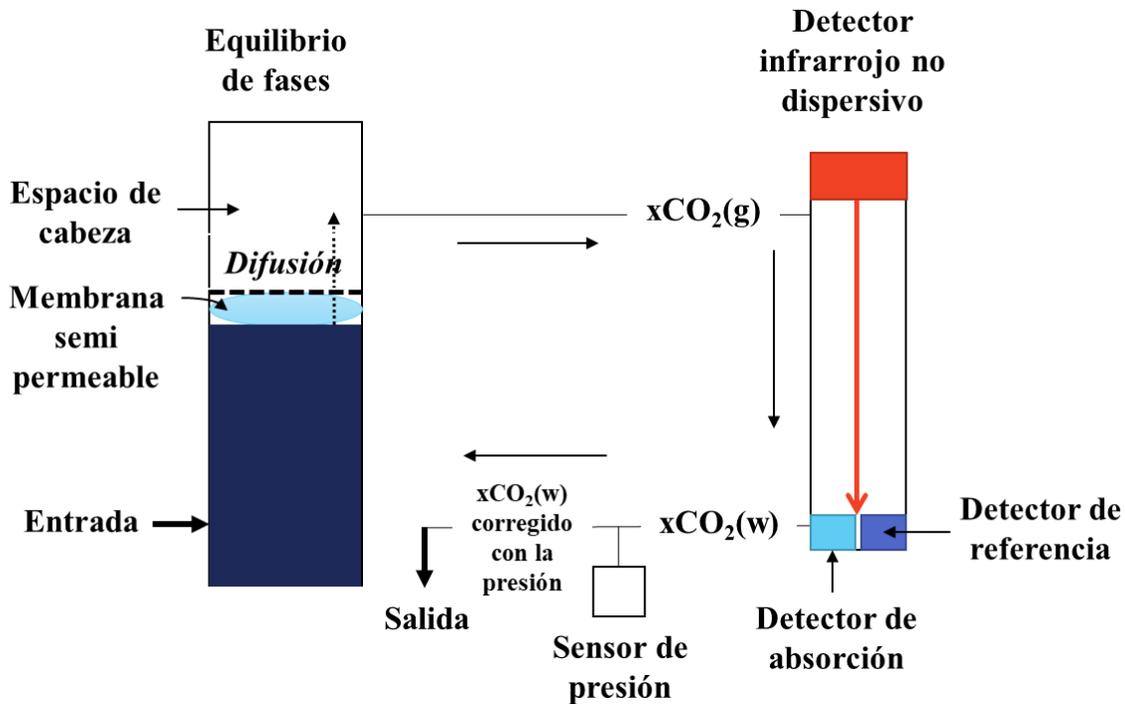


Figura 3.2. Diagrama del sensor Mini CO<sub>2</sub>.

### 3.1.3. Datos de otras variables de interés

Los sensores utilizados en las estaciones y sus especificaciones de forma resumida se encuentran en la Tabla 3.1. Entre otros sensores que posee el Observatorio Costero de Puerto Morelos, se encuentran tres sensores HOBO®, cuyas características son:

- El sensor *HOBO Pro V2 Water Temperature Data Logger U22-001* mide temperatura. Su intervalo de operación es de  $-40^{\circ}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ , su resolución es de  $0.02^{\circ}\text{C}$  y su exactitud de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ .
- El sensor *HOBO Dissolved Oxygen Logger U26-001* mide oxígeno disuelto y temperatura en ambientes marinos. Su intervalo de medición es de 0 a 30 mg/L, su resolución es de 0.02 mg/L y exactitud de  $\pm 0.2$  mg/L. Para la temperatura su intervalo es de  $-5$  a  $40^{\circ}\text{C}$ , su resolución es de  $0.02^{\circ}\text{C}$  y su exactitud de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ .
- El sensor *HOBO Conductivity Data Logger U24-002* registra datos de conductividad eléctrica y temperatura. Su intervalo de operación es de 5,000 a 65,000  $\mu\text{S/cm}$ , con una resolución de 2  $\mu\text{S/cm}$  y exactitud de  $\pm 50$   $\mu\text{S/cm}$ . Para la temperatura su intervalo de medición es de  $-2^{\circ}$  a  $36^{\circ}\text{C}$ , su resolución es de  $0.01^{\circ}\text{C}$  y su exactitud de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .

Tabla 3.1. Especificaciones de los sensores del Observatorio Costero de Puerto Morelos.

Parámetro	Sensor	Intervalo de medición	Resolución	Exactitud ( $\pm$ )
Oxígeno disuelto (mg/L)	HOBO Dissolved Oxygen Logger U26-001	0 – 30	0.02	0.2
pCO <sub>2</sub> (ppm)	Pro-Oceanus Digital Mini CO <sub>2</sub>	0 – 1000	1	20
pH	SeaFET Ocean pH Sensor	6.5 – 9	0.0001	0.05
Conductividad ( $\mu$ S/cm)	HOBO Conductivity Data Logger U24-002	5000 – 65000	2	50
Temperatura (°C)	HOBO Pro V2 Water Temperature Data Logger U22-001	-40 – 70	0.02	0.2
	Pro-Oceanus Digital Mini CO <sub>2</sub>	-2 – 40		
	SeaFET Ocean pH Sensor	0 – 50		

### 3.2. Proceso de calificación de datos

Las medidas presentaron en ocasiones valores extraños, que pueden ser causados por errores instrumentales, por ejemplo, lecturas erróneas, pérdida de calibración o errores humanos. Para eliminar los datos erróneos, se realizó un análisis de calidad de datos sobre las series temporales donde se tomaron en cuenta tres categorías de calificación (QF): valores no aceptados (QF = 2), valores en duda (QF = 1) y valores aceptados (QF = 0). Si bien todos los datos fueron calificados, no fueron eliminados de la base de datos original.

En primer lugar, se compilaron los datos de todas las variables en sus diversos formatos (archivos .txt, .csv o .xls). Para que las series de datos estuvieran correctamente ordenadas, todos los tiempos de medida se transformaron al formato de tiempo universal coordinado (UTC, por sus siglas en inglés), mediante el software estadístico *RStudio Version 3.3.2* (R Core Team, 2018) y el paquete *lubridate* (Grolemund y Wickham, 2011). Posteriormente, se calificaron los datos de acuerdo con los siguientes cuatro filtros:

1. Intervalo instrumental (Tabla 3.1): a los valores fuera del intervalo de medida del instrumento se les asignó QF = 2.
2. Intervalo estadístico directo: se definió un intervalo conformado por los límites máximos y mínimos del promedio y 3 veces su desviación estándar mensual. Este filtro permite detectar

medidas que pueden ser *outliers*. Los datos fuera del intervalo se consideraron como dudosos y se les asignó  $QF = 1$ .

- Intervalo estadístico diferencial: en primer lugar, se obtuvo la función derivada respecto al tiempo como el cociente de incrementos de la medida respecto al incremento del tiempo. Con esto, se definió un intervalo conformado por los límites máximo y mínimo de 3 veces la desviación estándar mensual de la función derivada. Este filtro permite identificar medidas que presentan una velocidad de variación demasiado elevada. Los datos fuera del intervalo se consideraron como dudosos y se les asignó  $QF = 1$ . Posterior a los filtros 2 y 3, los datos con  $QF = 1$  se revisaron manualmente. A los que se encontraron en el mismo intervalo de datos aceptados se les asignó  $QF = 0$ .
- Análisis de *outliers*: finalmente, se revisaron manualmente observaciones aceptadas que se encontraban muy lejos del resto de las demás observaciones (*outliers*) mediante *boxplots* y observaciones que se identificaron como no correspondientes a medidas *in situ* (p.e. calibración del instrumento). A estos datos se les asignó  $QF = 2$ .

### 3.3. Paquete de R seacarb

El paquete *Seawater Carbonate Chemistry* (abreviado como *seacarb*) (Gattuso *et al.*, 2019) está diseñado para calcular los parámetros del sistema de carbonatos marinos. Entre sus múltiples funciones se encuentra *carb*, del cual se obtienen los parámetros del sistema de carbonatos del agua de mar (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Variables del sistema de carbonatos obtenidas con la función “carb”.

Variable	Unidad	Variable	Unidad
Salinidad	-	$pCO_2$ <i>in situ</i>	$\mu atm$
Temperatura	$^{\circ}C$	$fCO_2$ <i>in situ</i>	$\mu atm$
Presión atmosférica	atm	Concentración de $HCO_3^-$	$mol\ kg^{-1}$
Presión hidrostática	bar	Concentración de $CO_3$	$mol\ kg^{-1}$
pH	-	Concentración DIC	$mol\ kg^{-1}$
Concentración de $CO_2$	$mol\ kg^{-1}$	Alcalinidad total	$mol\ kg^{-1}$
$pCO_2$ estándar	$\mu atm$	$\Omega_{aragonita}$	-
$fCO_2$ estándar	$\mu atm$	$\Omega_{calcita}$	-

Para cuantificar el sistema de carbonatos marinos es necesario disponer al menos de dos de las siguientes variables: alcalinidad, carbono inorgánico disuelto,  $CO_3^{2-}$ ,  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$ ,  $pCO_2$  y pH. En nuestro caso, se utilizaron  $pCO_2$  y pH. Además, se requieren valores de salinidad, temperatura ( $^{\circ}C$ ), presión atmosférica (atm) y presión hidrostática (bar). La librería *seacarb* se utilizó para obtener los valores de  $\Omega_{calcita}$  y  $\Omega_{aragonita}$  correspondientes al mes de septiembre de 2016, periodo durante el cual

se disponía una matriz completa de las variables necesarias para obtener los parámetros del sistema de carbonatos.

### 3.4. Análisis estadísticos

Se realizaron diversos análisis y pruebas estadísticas a las variables obtenidas con los sensores y del sistema de carbonatos, los cuales se indican en la Tabla 3.3. El primer análisis realizado para comprobar la normalidad de las series temporales fue el test de normalidad de Anderson-Darling, adecuado para tamaños de muestra mayores a 5,000 unidades (Gross y Ligges, 2015). La significancia estadística  $p$  ( $p$ -value) de las seis series fue menor a 0.05 (es decir, los datos son no-normales), por ello se utilizaron métodos estadísticos no paramétricos.

Tabla 3.3. Análisis y pruebas estadísticas que se realizaron a cada variable. C: conductividad, OD: oxígeno disuelto,  $pCO_2$ : presión parcial de  $CO_2$ , T: temperatura, Alc: alcalinidad, DIC: carbono inorgánico disuelto.

Análisis y pruebas realizados	Variables									
	C	OD	$pCO_2$	pH	T	Alc	$\Omega_a$	$HCO_3^-$	$CO_3^{2-}$	DIC
Prueba de normalidad de Anderson-Darling	●	●	●	●	●					
Correlación de Spearman	●▲	●▲	▲	●▲	●▲	▲	▲	▲	▲	▲
Prueba de normalidad Shapiro-Wilk				●						
Regresión local <i>loess</i>		●	●	●	●					
Descomposición de la serie temporal				●						
Wavelet de Transformada Continua				●						
Análisis de factores	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲

● Indica que el análisis se realizó a la variable de forma individual.

▲ Indica que el análisis se realizó con todas las variables marcadas de forma grupal.

Por otra parte, se elaboraron *boxplots* mensuales de las series de OD, pH y temperatura, así como uno diario de la  $pCO_2$ . Para la serie de pH se obtuvieron los valores mensuales de los cuartiles Q1 (25%) y Q3 (75%), los percentiles al 95% (2.5% y 97.5%), la desviación estándar, media, mediana, variabilidad y se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, que utiliza tamaños de muestra entre 3 y 5,000 unidades (Razali y Wah, 2011; RCoreTeam, 2018).

### 3.4.1. Correlación de Spearman

El método de correlación de Spearman es una técnica bivariada no paramétrica que mide el grado de relación o asociación que existe entre dos variables aleatorias cuyo valor varía entre  $-1 \leq \rho \leq 1$ . Entre sus ventajas se encuentran que permite la presencia de *outliers* y que es libre de distribución probabilística (Restrepo y González, 2007). La correlación de Spearman se calculó con la función *cor* de R (R Core Team, 2018) y se obtuvieron los gráficos de correlación con la función *pairs* (R Core Team, 2018) para las series temporales de un año de duración aproximadamente de conductividad, OD, pH y temperatura, así como para el periodo de estudio (septiembre de 2016) y las variables del sistema de carbonatos.

Dado que las medidas de conductividad, OD, pH y temperatura corresponden a dos estaciones próximas, se investigó si era posible unir ambas series de la misma variable mediante una prueba de correlación de Spearman de los datos en tiempos coincidentes. De la prueba se obtuvieron altas correlaciones positivas entre las variables de las estaciones 01 y 02 (Tabla 3.4) con lo que se comprobó que los datos de las mismas variables son similares y se pueden unir en una misma serie de tiempo. La serie de temperatura se construyó a partir de los registros de los sensores HOBO *Pro V2 Water Temperature Data Logger U22-001*, *Pro-Oceanus Digital Mini CO<sub>2</sub>* y *SeaFET*. La prueba también se realizó con las mediciones de los sensores de *Mini CO<sub>2</sub> 292* y *293*, de la cual se obtuvo una correlación negativa ( $\rho = -0.29$ ) por lo que se decidió utilizar únicamente la serie del sensor *Mini CO<sub>2</sub> 293*.

Tabla 3.4. Correlaciones  $\rho$  de Spearman entre variables iguales de las estaciones 01 y 02 del observatorio costero de Puerto Morelos. Se realizó la correlación entre cinco sensores que pueden medir temperatura con el objetivo de crear una serie de largo plazo. La estación 01 cuenta con el sensor *MiniCO<sub>2</sub>-292* el cual mide también mide temperatura, pero los registros de este sensor no se consideraron para este estudio.

Estación 01		Estación 02				
Variable	Conductividad	Oxígeno Disuelto	pH	Temperatura HOBO U22-001	Temperatura MiniCO <sub>2</sub> 293	Temperatura <i>SeaFET</i>
Conductividad	0.99					
Oxígeno Disuelto		1				
pH			0.99			
Temperatura HOBO U22-001				0.95	0.95	0.98
Temperatura <i>SeaFET</i>				0.96	0.74	0.99

### 3.4.2. Regresión local *loess*

Los procedimientos de suavizado se utilizan para resumir la asociación entre una variable predictora  $x$  y su respuesta en  $y$  (Friedman, 1984). Uno de ellos es el método *loess* (*locally estimated scatterplot smoothing*, por sus siglas en inglés) que es la regresión ponderada localmente, es decir una curva o una técnica de ajuste de funciones, que proporciona una curva suavizada. Sus principales ventajas son que ajusta modelos no-paramétricos y se puede utilizar con datos multidimensionales y múltiples variables dependientes (SAS Institute, 1999).

Suponiendo que  $x_i$  y  $y_i$  para  $i = 1$  a  $n$  son medidas de las variables independiente y dependiente, respectivamente, el suavizado se realiza mediante la Ecuación 3.10:

$$y_i = g(x_i) + \epsilon_i \quad [3.10]$$

Donde  $g(x)$  es la curva de la regresión y  $\epsilon_i$  los residuales (Cleveland, 1979; Friedman, 1984; SAS Institute, 1999). Uno de los parámetros importantes es el espaciado (*span*) o el tamaño del vecindario sobre el cual se lleva a cabo el promedio, ya que controla el suavizado: mientras mayor sea el *span* mayor será el suavizado de la curva. El espaciado que se utilizó para todas las series temporales fue de 0.1 debido a que muestra con mayor resolución los patrones y tendencias.

Mediante la función *loess* de R (R Core Team, 2018), se realizó la regresión local para las series de pH, pCO<sub>2</sub>, temperatura, OD y conductividad. De los resultados obtenidos de la regresión local para la serie de pH, se calcularon los residuales (Ecuación 3.11) y la variabilidad mensual (Ecuación 3.12). Asimismo, se obtuvieron los residuales para la serie de pCO<sub>2</sub> con el fin de corregir la parte inicial de la serie (de septiembre a octubre de 2016), puesto que se tenía registrada una deriva del instrumento en el periodo de análisis.

$$\text{Residuales} = \text{Valores medidos} - \text{Valores suavizados} \quad [3.11]$$

$$\text{Variabilidad (\%)} = \frac{\text{desviación estándar Residuales}}{\text{mediana}} \times 100 \quad [3.12]$$

### 3.4.3. Descomposición de la serie temporal de pH

Mediante la función *stl* de R (Cleveland *et al.*, 1990) se descompuso la serie de pH de septiembre de 2016. La función *stl* es un procedimiento de filtrado para descomponer una serie temporal en tres partes: la tendencia que es el aumento o disminución de los valores, la estacionalidad que se refiere a los ciclos que se repiten y los residuales o variaciones restantes de los datos. Esta función permite descomponer series que tengan valores faltantes y evita que se deforme la tendencia por algún comportamiento extraño que contengan los datos, lo cual realiza mediante el suavizado *loess* (Cleveland *et al.*, 1990).

#### 3.4.4. Transformada *Wavelet*

La Transformada *Wavelet* es una herramienta para analizar variaciones locales de series temporales (Torrence y Compo, 1998), que la transforma a un espacio de frecuencia-tiempo para encontrar periodicidades intermitentes localizadas temporalmente (Grinsted *et al.*, 2004). Existen dos clases de wavelets: la transformada wavelet continua (CWT, por sus siglas en inglés) y la transformada wavelet discreta (DWT, por sus siglas en inglés). En el caso de las series temporales geofísicas, la CWT es más útil cuando se requiere extraer y analizar oscilaciones intermitentes localizadas en una serie temporal (Grinsted *et al.*, 2004). Se realizó la CWT para la serie temporal estandarizada de pH con la función *wt* de R de la librería *biwavelet* (Gouhier *et al.*, 2018), que requiere de una matriz de dos columnas (fecha y variable). Se utilizó la función de Morlet y el nivel de significancia de 0.95.

#### 3.4.5. Análisis de Factores

El análisis de factores es una técnica estadística de análisis multivariada cuyo propósito principal es explicar las correlaciones de numerosas variables llamadas observables  $x'$  por medio de un grupo menor de variables llamadas factores (Cuevas Renaud, 1996; Zamora Muñóz *et al.*, 2010). De este análisis, se obtienen las cargas factoriales, que indican la correlación entre cada variable y el factor correspondiente. Una variable con mayor carga factorial será más representativa del factor y se puede interpretar la función que cumple cada variable para definir cada uno de los factores (Zamora Muñóz *et al.*, 2010). El análisis de factores se realizó con 561 observaciones de las variables de conductividad, OD, pCO<sub>2</sub>, pH, temperatura, alcalinidad, DIC, los iones carbonato y bicarbonato respecto al tiempo (Anexo 8.1), mediante la función *factanal* de R (R Core Team, 2018), con el tipo de rotación “*varimax*”.

## 4. Resultados

Los datos aceptados de las estaciones 01 y 02 del observatorio costero de Puerto Morelos se muestran en la Figura 4.1. Se realizaron tres bases de datos de acuerdo con su disponibilidad en un mismo periodo: i) la primera contiene registros desde septiembre de 2016 a diciembre de 2017 de cuatro variables (conductividad, OD, pH y temperatura), ii) la segunda base contiene registros de 17 días de septiembre de 2016 de cinco variables (conductividad, OD, pCO<sub>2</sub>, pH y temperatura) y iii) por último, la tercera base de datos contiene información de 17 días de septiembre de 2017 de 11 variables (conductividad, OD, pCO<sub>2</sub>, pH, temperatura,  $\Omega_{\text{calcita}}$ ,  $\Omega_{\text{aragonita}}$ , alcalinidad, DIC, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Las pruebas de normalidad de Anderson-Darling que se realizaron para las cinco variables registradas *in situ* demostraron que las series son no-normales (valor  $p < 2.2 \times 10^{-16}$ ).

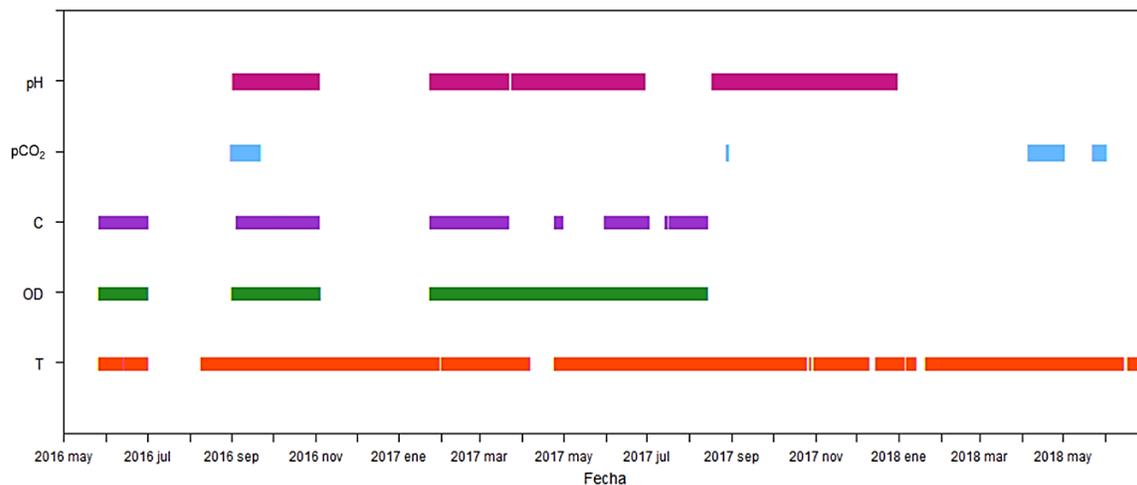


Figura 4.1 Diagrama de presencia de los datos aceptados del observatorio costero de Puerto Morelos. OD: oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>, T: temperatura, C: conductividad.

La calificación las series temporales (Tabla 4.1) mostró que la serie de pCO<sub>2</sub> tuvo la mayor cantidad de datos no aceptados (65.8%) porque presentó varios episodios de deriva de pCO<sub>2</sub> con valores muy altos (mayores a 1,000 ppm, con un máximo de 2,000 ppm). Esto ocurrió probablemente por la formación de una biopelícula en la membrana de intercambio de gases lo cual se evita al revisar de forma constante el sensor para limpiarlo. La serie de pH también tuvo una cantidad cercana al 54% de datos no aceptados, debido a una deriva presentada a partir de finales de enero a junio de 2018, donde el sensor registró datos fuera del intervalo instrumental.

Tabla 4.1. Resultados de la calificación de los datos del Observatorio Costero de Puerto Morelos. QF=0: valor aceptado, QF=1: valor dudoso, QF=2: valor no aceptado.

Variable	Fecha inicial	Fecha final	Total	Calificación (QF)					
				Entero			Porcentaje (%)		
				0	1	2	0	1	2
Conductividad	2016-05-27	2017-08-14	15312	12430	1230	1652	72.72	8.03	16.30
OD	2016-06-27	2017-08-14	14398	14287	0	107	99.23	0	0.72
pCO <sub>2</sub>	2016-08-31	2018-06-02	7452	2546	3	4903	34.16	0.04	65.79
pH	2016-09-01	2018-07-24	34519	16263	0	18256	47.11	0	53.66
Temperatura	2016-05-27	2018-07-24	49390	46307	52	3031	93.75	0.10	6.13

## 4. 1. Serie de pH

Se obtuvo una serie de pH con datos aceptados del 2016-09-01 al 2017-12-31 (Figura 4.2). En los meses de invierno de 2017 se presentaron los principales periodos de disminución de pH, principalmente en febrero de 2017. En la Figura 4.3 se observa el valor mínimo, así como la mediana más baja. Por otra parte, se calculó la estadística básica mensual del pH, es decir, la media, la mediana, el primer cuantil, el tercer cuantil, el percentil 2.5, el percentil 97.5, la variabilidad y el *p-value* mensual (Tabla 4.1).

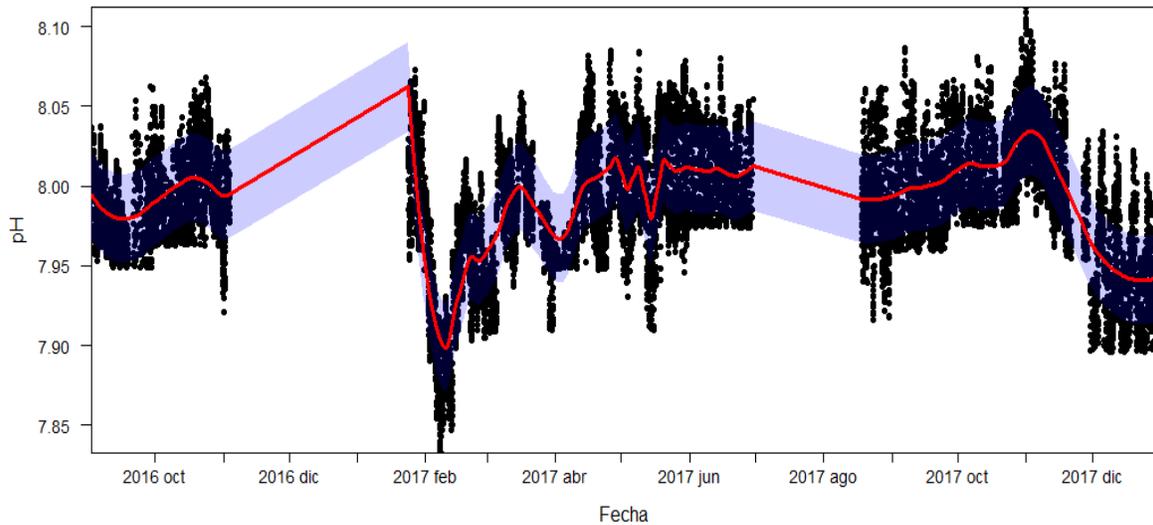


Figura 4.2. Gráfica de pH con regresión local.

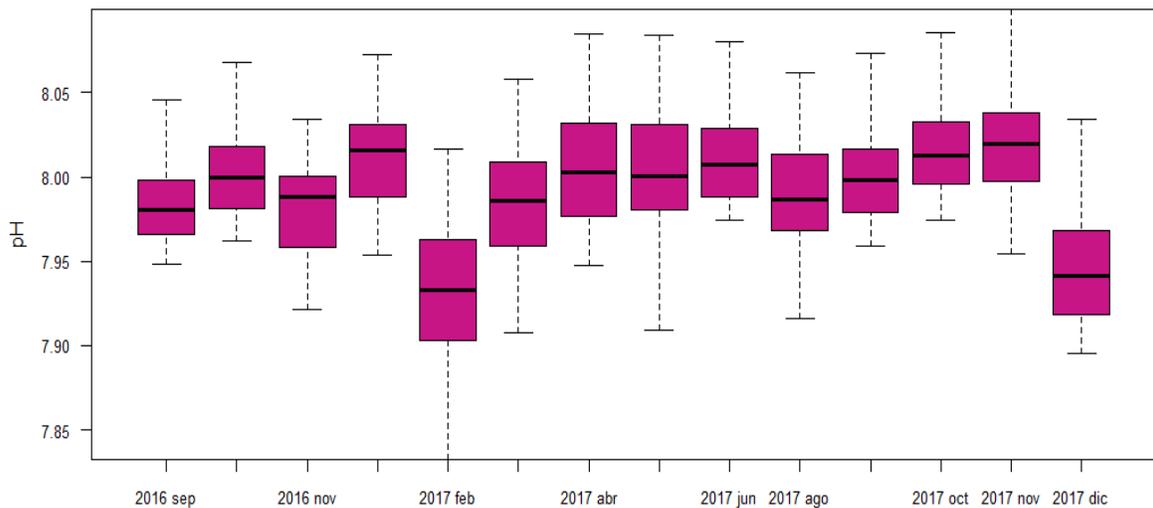


Figura 4.3. Distribución mensual de pH.

Tabla 4.2. Estadística básica mensual de la serie de pH.  $\sigma_R$ : desviación estándar de los residuales.

Año	Mes	Media	Mediana	$\sigma_R$	Percentil 2.5%	Cuartil 25%	Cuartil 75%	Percentil 97.5%	Variabilidad (%)	Valor p
2016	09	7.96	7.97	0.02	7.89	7.94	7.99	8.02	0.36	2.38e <sup>-06</sup>
	10	7.98	7.98	0.03	7.91	7.96	8.01	8.04	0.37	1.66e <sup>-06</sup>
	11	7.98	7.98	0.02	7.93	7.95	8.00	8.03	0.35	4.50e <sup>-05</sup>
	12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2017	01	8.01	8.01	0.03	7.96	7.98	8.03	8.06	0.43	7.73e <sup>-05</sup>
	02	7.93	7.93	0.03	7.85	7.90	7.96	7.99	0.41	1.81e <sup>-11</sup>
	03	7.98	7.98	0.02	7.91	7.95	8.00	8.03	0.35	8.15e <sup>-14</sup>
	04	7.98	7.98	0.03	7.88	7.94	8.01	8.06	0.44	1.34e <sup>-10</sup>
	05	8.00	8.00	0.03	7.94	7.98	8.03	8.06	0.38	< 2.2e <sup>-16</sup>
	06	7.99	7.99	0.02	7.93	7.97	8.02	8.04	0.37	3.94e <sup>-16</sup>
	07	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	08	7.99	7.98	0.03	7.93	7.96	8.01	8.05	0.40	3.17e <sup>-07</sup>
	09	7.98	7.98	0.03	7.92	7.95	8.00	8.05	0.43	1.16e <sup>-04</sup>
	10	7.99	8.00	0.03	7.92	7.97	8.02	8.06	0.41	1.86e <sup>-09</sup>
	11	7.98	8.00	0.03	7.85	7.95	8.03	8.07	0.47	< 2.2e <sup>-16</sup>
	12	7.92	7.92	0.04	7.85	7.89	7.95	8.01	0.52	1.28e <sup>-05</sup>

#### 4.1.1. Periodicidad

Para conocer la periodicidad del pH durante un año, se obtuvo el Wavelet de Transformada Continua (WTC) de la serie de pH de 2017. Se omitieron los datos de 2016 donde se presentaron varios periodos sin mediciones para evitar la aleatoriedad o la existencia de resultados sin sentido debido a una alta variación. En la Figura 4.4, el eje  $x$  es el tiempo de la serie de pH en meses y el eje  $y$  el periodo en días, los contornos gruesos indican un nivel de confianza del 95%; este tipo de figura contiene también un contorno blanco conocido como cono de influencia dentro del cual los efectos de borde como frecuencias falsas, pueden ser ignorados (González González, 2018; Grinsted *et al.*, 2004). La barra lateral indica las potencias, de altas (color rojo) a bajas (color azul).

De manera general se observaron periodicidades de potencia alta (entre  $3.2 \times 10^3$  y  $1.0 \times 10^3$ ) en un periodo de 24 horas a lo largo del año 2017, lo que indica los ciclos diarios de pH. El espacio en azul que se presenta a finales de junio hasta inicios de agosto indica que no hay registros durante ese tiempo. En la Figura 4.4 las periodicidades se encuentran dentro del cono de influencia, el cual no se presentó debido a que el área que abarca el cono es muy amplia.

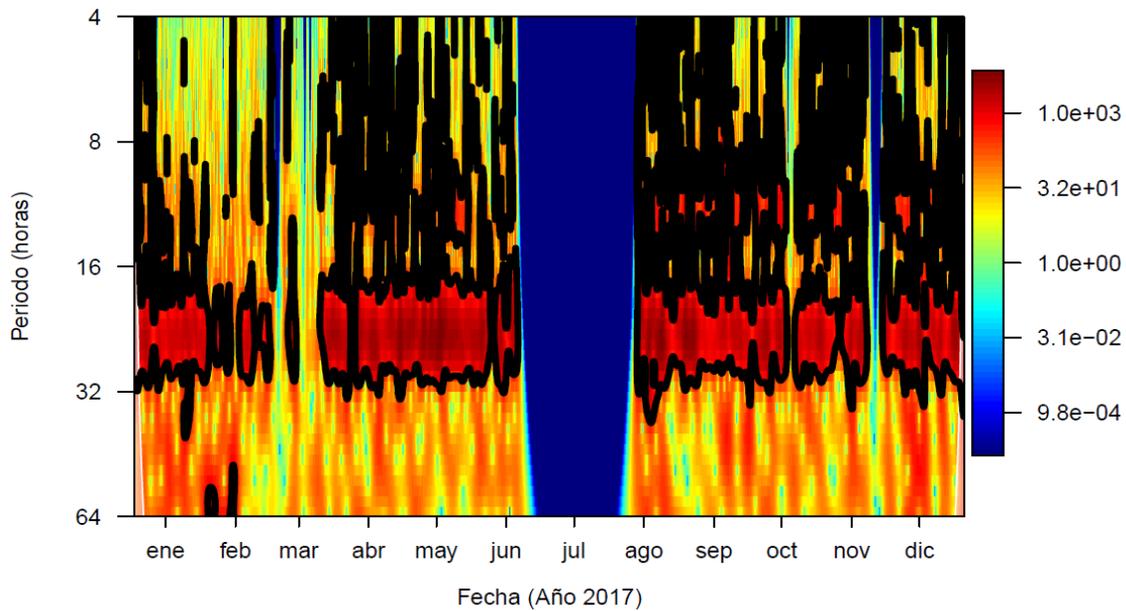


Figura 4.4. Wavelet de Transformada Continua de pH de 2017.

## 4. 2. Series de oxígeno disuelto, temperatura y conductividad

Los valores reportados para la conductividad del intervalo de 31,000 a 39,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 4.5) se consideraron más bajos de lo esperado para Puerto Morelos. En la UASAP ha registrado que la salinidad promedio en la zona cercana al arrecife es de 36, mientras que en la costa varía de 35 a 38, lo que corresponde a valores de conductividad cercanos a 50,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Escalante, E., comunicación personal, 2019). Este error fue debido a una errónea operación del sensor. Los datos de conductividad se utilizaron en los análisis estadísticos, pero se excluyeron en el cálculo de los estados de saturación.

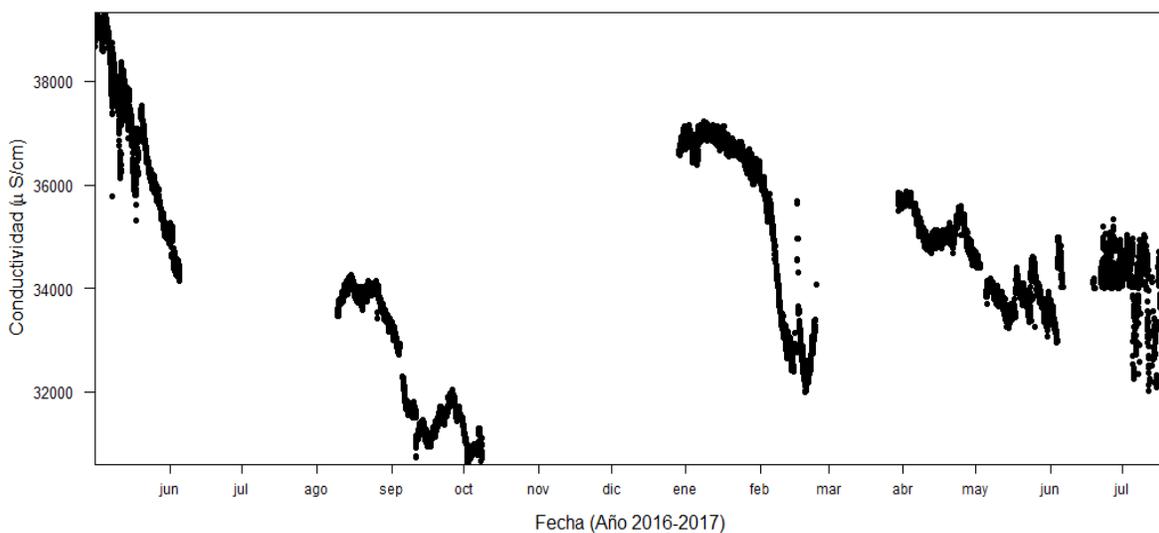


Figura 4.5. Gráfica de conductividad.

El oxígeno disuelto (OD) se mantuvo en intervalos similares durante la mayor parte del periodo de estudio ya que en la Figura 4.6 se observa que la línea roja se mantiene sin pocos cambios desde septiembre de 2016 a julio de 2017. En la Figura 4.7 se observa con mayor claridad que la mediana se mantiene entre 6 y 8 mg/L aproximadamente, durante el mismo periodo. Para el tiempo de medición completo se registró una mediana de 7.43 mg/L, con una ligera disminución en los meses de verano, probablemente debido a la disminución de la solubilidad del oxígeno con el incremento de la temperatura. Se presentó un evento de hipoxia entre mayo y junio de 2016, durante el cual se registró un mínimo de 0.81 mg/L y mayor variabilidad en los datos, evento que se observa con mayor claridad en la segunda caja de la Figura 4.7.

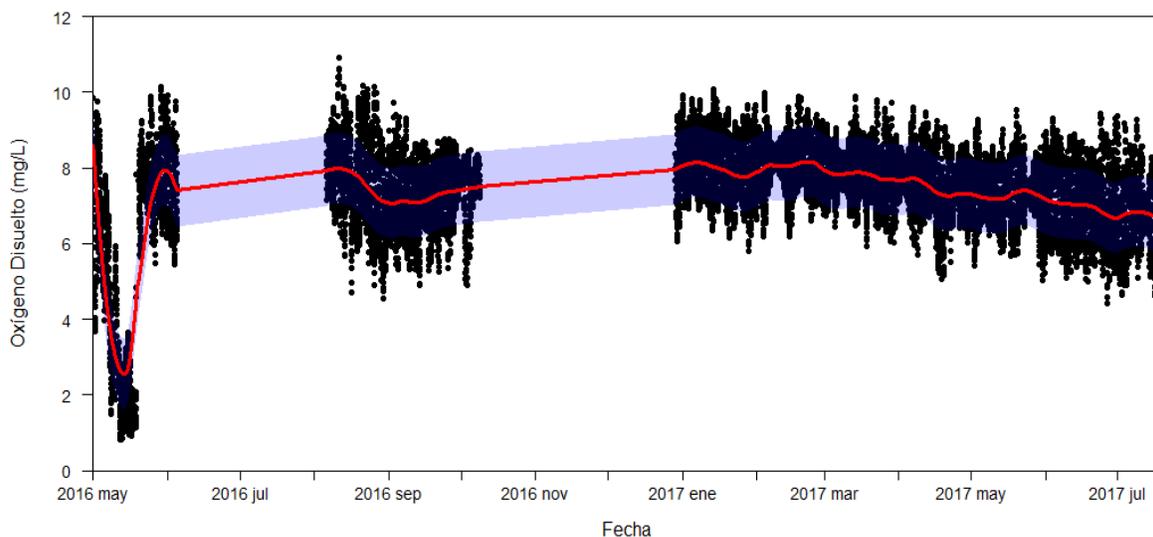


Figura 4.6. Gráfica de oxígeno disuelto con regresión local.

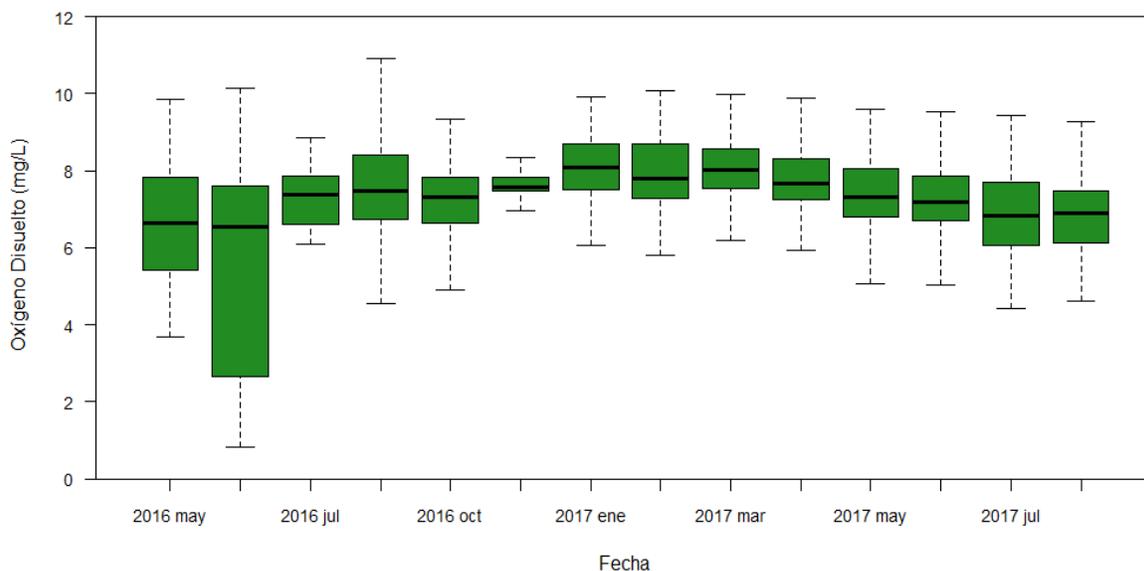


Figura 4.7. Distribución mensual de oxígeno disuelto.

La serie de temperatura (Figura 4.8) se construyó con los registros del sensor *HOBO U22-001* y se complementó con la información de los sensores *HOBO U26-001* y *SeaFET*. Esta serie fue la más larga y continua que se obtuvo, en la cual se observó la estacionalidad durante dos años. En la Figura 4.9 se observa que los valores más altos se registraron en los meses de julio a septiembre ( $32^{\circ}\text{C}$ ) y los valores más bajos de diciembre a enero ( $24.48^{\circ}\text{C}$ ), la mediana de temperatura para este periodo fue de  $28.66^{\circ}\text{C}$ .

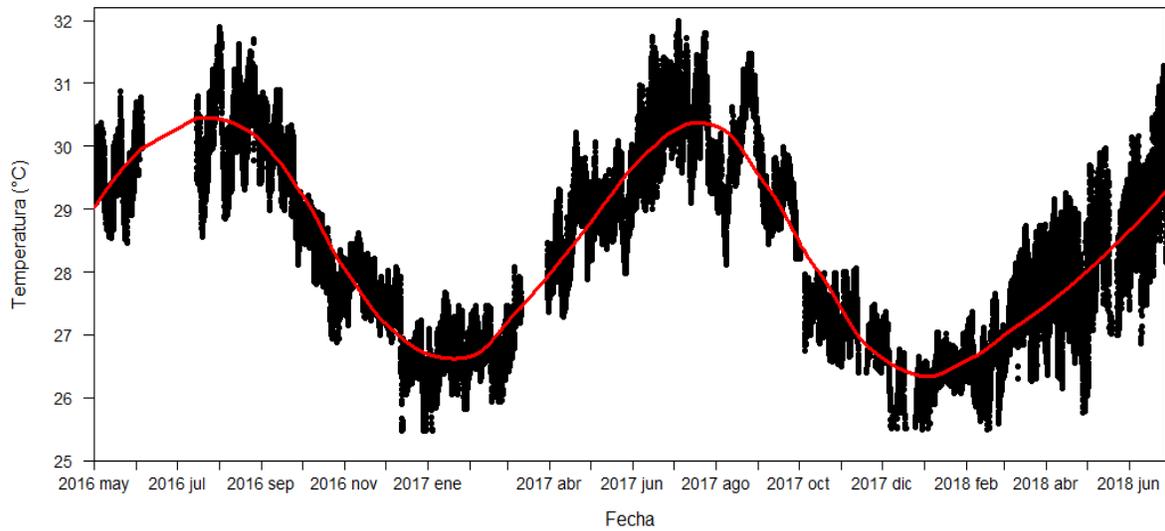


Figura 4.8. Gráfica de temperatura con regresión local.

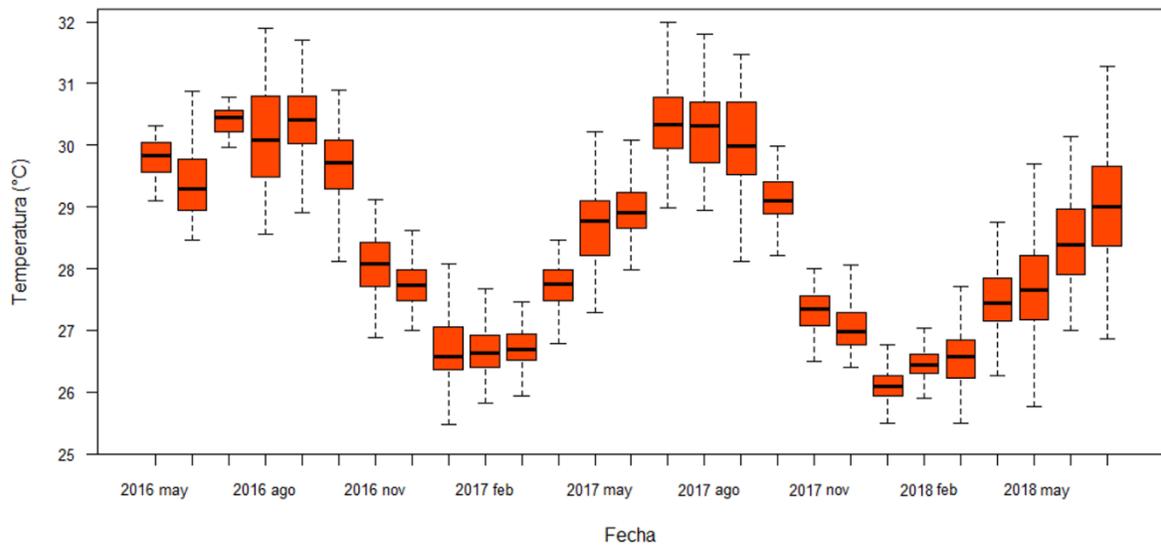


Figura 4.9. Distribución mensual de la temperatura.

#### 4.2.1. Correlaciones de las series de 2017

Con las series anteriores, se realizó un gráfico de dispersión para conocer la relación de las variables con el pH (Figura 4.10) en el año 2017, que tuvo el mayor número de datos aceptados ( $n = 21,415$ ). Se observó que no hay correlaciones altas del pH con ninguna otra variable ya que ningún valor de  $\rho$  fue cercano a  $\pm 0.8$ . La correlación positiva más alta fue con la temperatura ( $\rho = 0.43$ , valor  $p < 0.05$ ) y la negativa más baja fue con la conductividad ( $\rho = -0.43$ , valor  $p < 0.05$ ). En el gráfico de temperatura y conductividad ( $\rho = -0.57$ , valor  $p < 0.05$ ), se observan un conjunto de datos con valores altos de temperatura y bajos de conductividad y otro conjunto con temperaturas bajas y alta conductividad.

Tabla 4.3. Correlaciones  $\rho$  de Spearman de la base de datos de 2017. OD: oxígeno disuelto (mg/L), T: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), C: conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los números en negritas indican las correlaciones estadísticamente significativas.

Variable	OD	pH	T	C
OD	1.00	0.26	-0.28	0.27
pH	0.26	1.00	<b>0.43</b>	<b>-0.43</b>
T	-0.28	<b>0.43</b>	1.00	<b>-0.57</b>
C	0.27	<b>-0.43</b>	<b>-0.57</b>	1.00

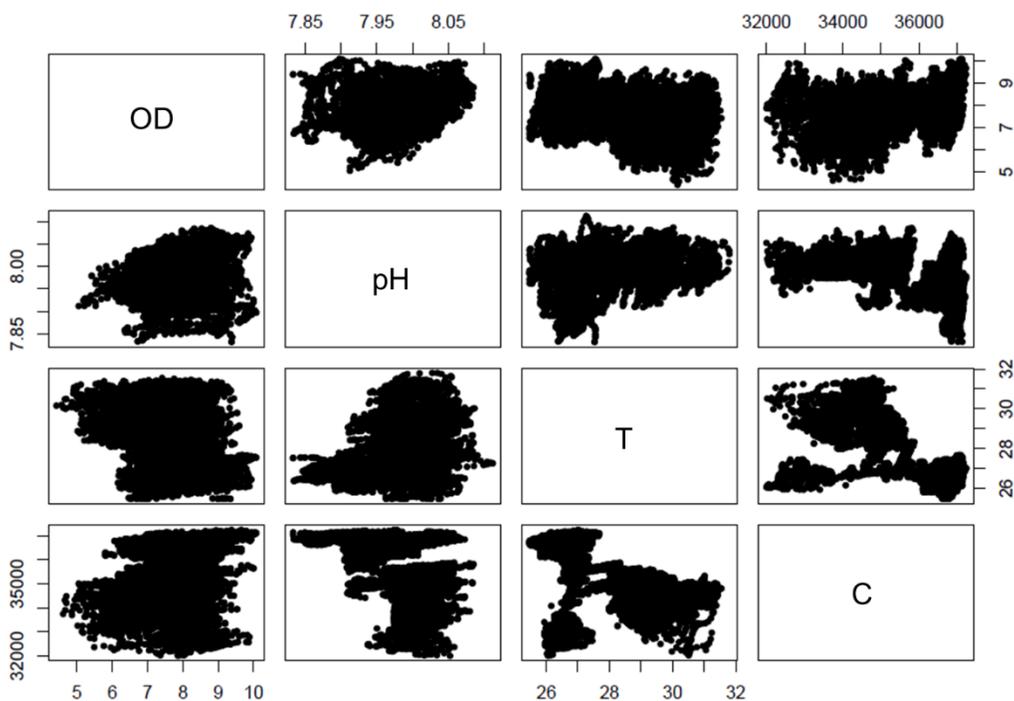


Figura 4.10. Gráfico de correlación de las series de 2017 del Observatorio Costero de Puerto Morelos. OD: oxígeno disuelto (mg/L), T: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), C: conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### 4. 3. Serie de pCO<sub>2</sub>

Además de las cuatro series de largo plazo, se obtuvo una serie de pCO<sub>2</sub> que se calculó a partir de la fracción molar de CO<sub>2</sub> y la presión registradas por el sensor. Dado que las lecturas del sensor derivaron durante la mayor cantidad del periodo de medición, se decidió utilizar el periodo de septiembre de 2016 (Figura 4.11), sin considerar los demás tramos que se registraron en 2017 y 2018 por su corta duración. La mediana de la pCO<sub>2</sub> se mantuvo entre 650 y 700  $\mu\text{atm}$  pero presentó mayor variabilidad de los datos a partir del día 14 (Figura 4.12), la cual se debe a la deriva del sensor en ese periodo. La serie se corrigió con la suma de los residuales y el promedio de los datos de este ciclo.

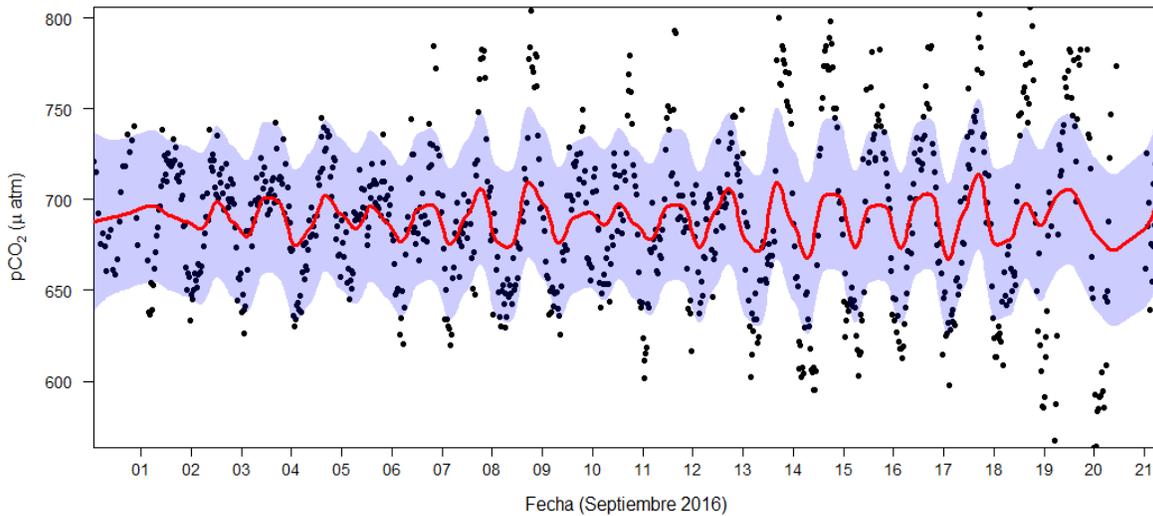


Figura 4.11. Serie de pCO<sub>2</sub> con regresión local.

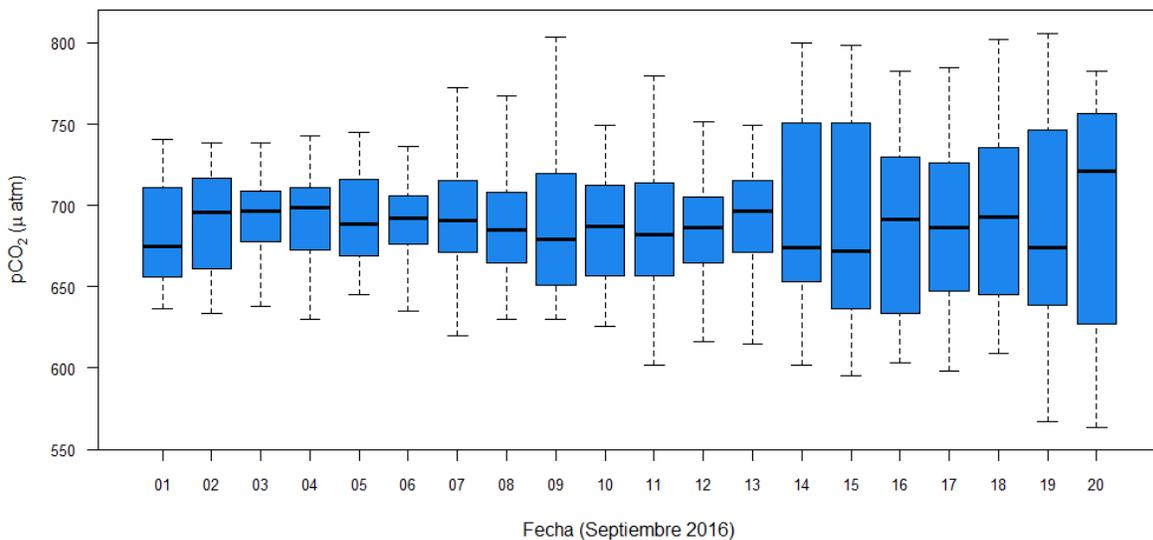


Figura 4.12. Distribución diaria de pCO<sub>2</sub>.

#### 4. 4. Series del periodo de estudio

El periodo de estudio se definió del día 2 al 18 de septiembre de 2016, por ser el único tiempo donde se tuvieron datos de todas las variables de interés. Al tratarse con un intervalo de tiempo menor, se graficaron los ciclos diarios del pH, la  $p\text{CO}_2$ , el OD y la temperatura con el fin de observar la dinámica entre algunos de los parámetros. Entre el pH y  $p\text{CO}_2$  se observó, en general, el aumento del pH cuando la  $p\text{CO}_2$  disminuye, asimismo se puede destacar que el intervalo de pH de 7.93 a 8.04 no cambia de forma tan extensa como el de la  $p\text{CO}_2$ , el cual presentó valores de 600 a 800  $\mu\text{atm}$  (Figura 4.13). Entre el OD y la  $p\text{CO}_2$  en general se observó que el OD aumenta cuando la  $p\text{CO}_2$  disminuye (Figura 4.14).

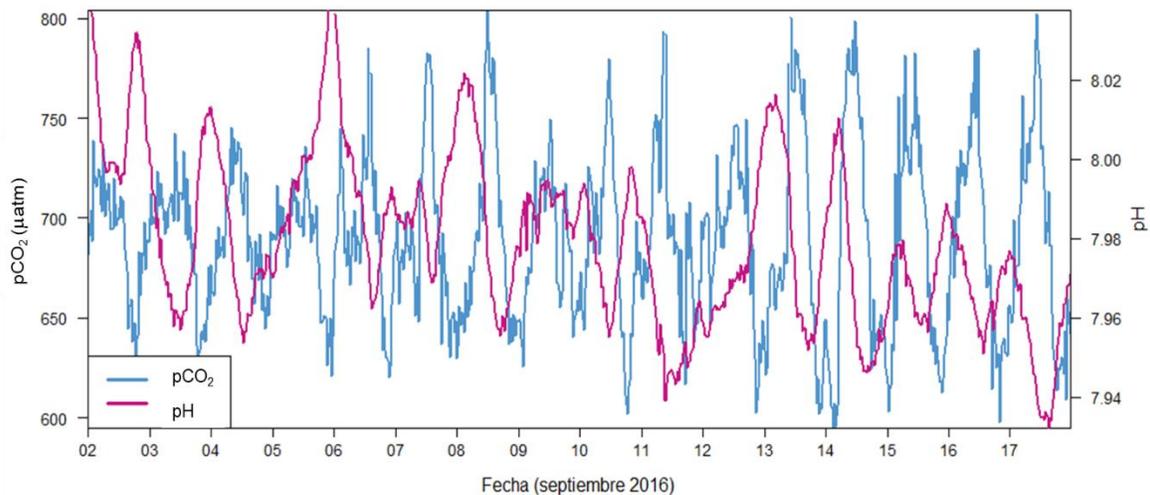


Figura 4.13. Gráfica de pH y de  $p\text{CO}_2$  para el mes de septiembre de 2016.

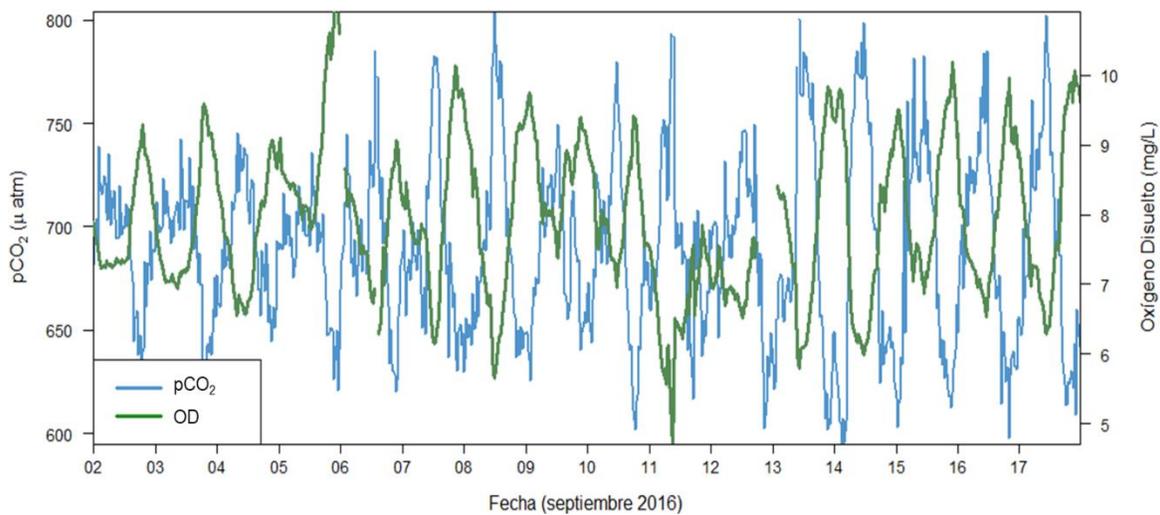


Figura 4.14. Gráfica de oxígeno disuelto (OD) y  $p\text{CO}_2$  para el mes de septiembre de 2016.

Por último, también se presentó un comportamiento similar diario entre la temperatura y la  $p\text{CO}_2$ , aunque la relación entre la solubilidad del  $\text{CO}_2$  y la temperatura durante los 17 días es poco visible, ya que se esperaba observar que en el periodo donde incrementa la temperatura se presentaran los valores de  $p\text{CO}_2$  más bajos y viceversa (Figura 4.15).

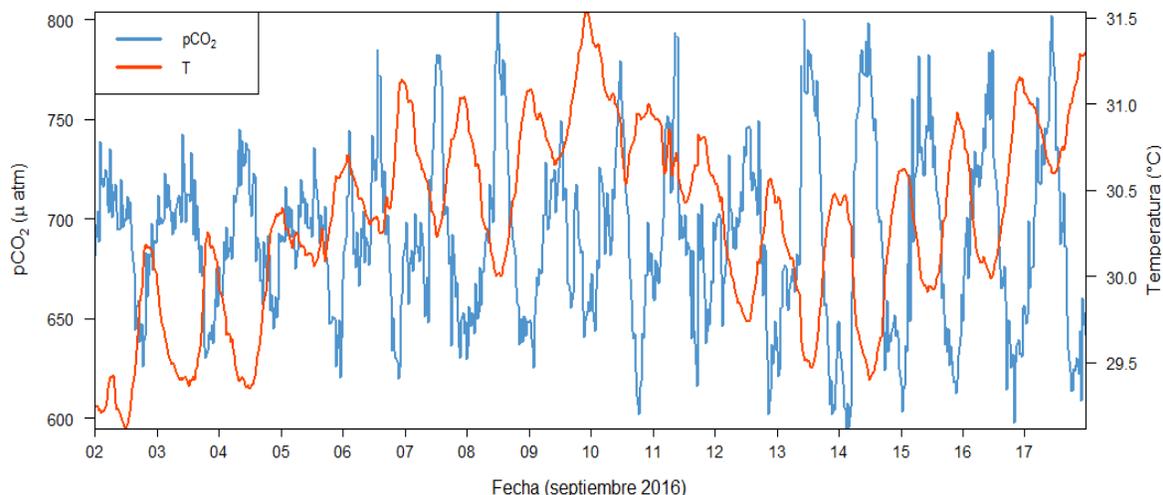


Figura 4.15. Gráfica de temperatura para el mes de septiembre de 2016.

#### 4.4.1. Variabilidad del pH

Se descompuso la serie temporal de pH en el periodo de septiembre de 2016 para conocer su variabilidad. El primer panel muestra la serie completa de pH en ese mes. En el segundo panel la descomposición mostró patrones que se repitieron de manera diaria. El tercero muestra una tendencia que disminuye entre los días 11 y 16 del mes. Por último, el cuarto panel muestra la variación restante en los datos, donde los residuales más altos se presentaron entre los días 16 y 21 (Figura 4.16).

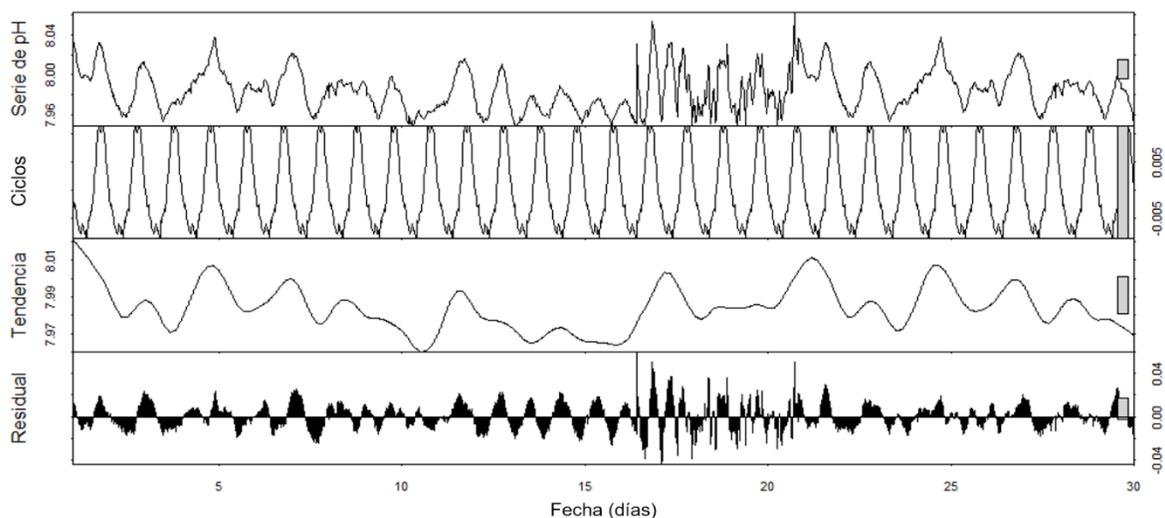


Figura 4.16. Descomposición de la serie temporal de pH en el mes de septiembre de 2016. Las unidades los ejes verticales corresponden a las unidades del pH. Los rectángulos grises en el eje vertical derecho indican una escala de 0.01.

#### 4.4.2. Periodicidad del pH

Con la finalidad de observar los ciclos diarios con mayor detalle se realizó una WTC con la serie corta de pH de septiembre de 2016 (Figura 4.17), con un periodo en horas. Se registraron periodicidades con una potencia alta de 24 horas, durante intervalos cortos los días 02-04, 06-08, 12-16 y durante intervalos mayores a partir del día 21. La periodicidad de 24 horas se presenta de forma continua en los últimos días del mes, con su máxima potencia entre los días 22 a 30. Por último, la mayor periodicidad de 48 horas se presentó entre el día 02 y 08.

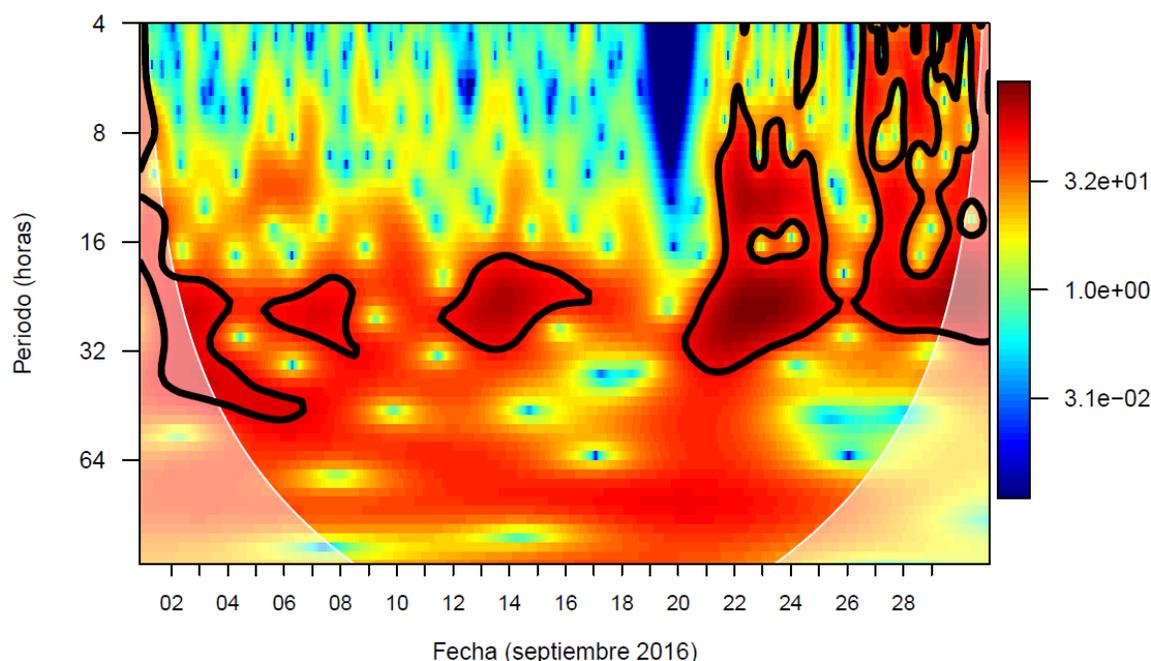


Figura 4.17. Wavelet de Transformada Continua de pH de septiembre de 2016.

#### 4.4.3. Correlaciones del periodo de estudio

Se realizó el gráfico de correlación para septiembre de 2016 con las cinco variables medidas en el observatorio costero ( $n = 561$ ) (Figura 4.18). Se observó una disminución del OD con el aumento de  $p\text{CO}_2$ , lo que refleja una alta correlación negativa ( $\rho = -0.81$ , valor  $p < 0.05$ ); asimismo, el OD presentó correlaciones positivas con la temperatura ( $\rho = 0.54$ , valor  $p < 0.05$ ) y la conductividad ( $\rho = -0.49$ , valor  $p < 0.05$ ). Por otro lado, se observó una alta correlación positiva entre la temperatura y la conductividad ( $\rho = 0.86$ , valor  $p < 0.05$ ). La correlación de la  $p\text{CO}_2$  y el pH es muy negativa ( $\rho = -0.17$ ,  $p = 2.23 \times 10^{-12}$ ), así como con la temperatura ( $\rho = -0.45$ , valor  $p < 0.05$ ) y la conductividad ( $\rho = -0.42$ , valor  $p < 0.05$ ). Además de estas correlaciones, el resto de los gráficos no muestra otras correlaciones significativas.

Tabla 4.4. Correlaciones  $\rho$  de Spearman de la base de datos de septiembre de 2016. OD: oxígeno disuelto (mg/L),  $p\text{CO}_2$  ( $\mu\text{atm}$ ), T: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), C: conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los números en negritas indican las correlaciones estadísticamente significativas.

Variable	OD	$p\text{CO}_2$	pH	T	C
OD	1.00	<b>-0.81</b>	0.29	<b>0.54</b>	<b>0.49</b>
$p\text{CO}_2$	<b>-0.81</b>	1.00	-0.17	<b>-0.45</b>	-0.42
pH	0.29	-0.17	1.00	-0.11	0.19
T	<b>0.54</b>	<b>-0.45</b>	-0.11	1.00	<b>0.86</b>
C	<b>0.49</b>	-0.42	0.19	<b>0.86</b>	1.00

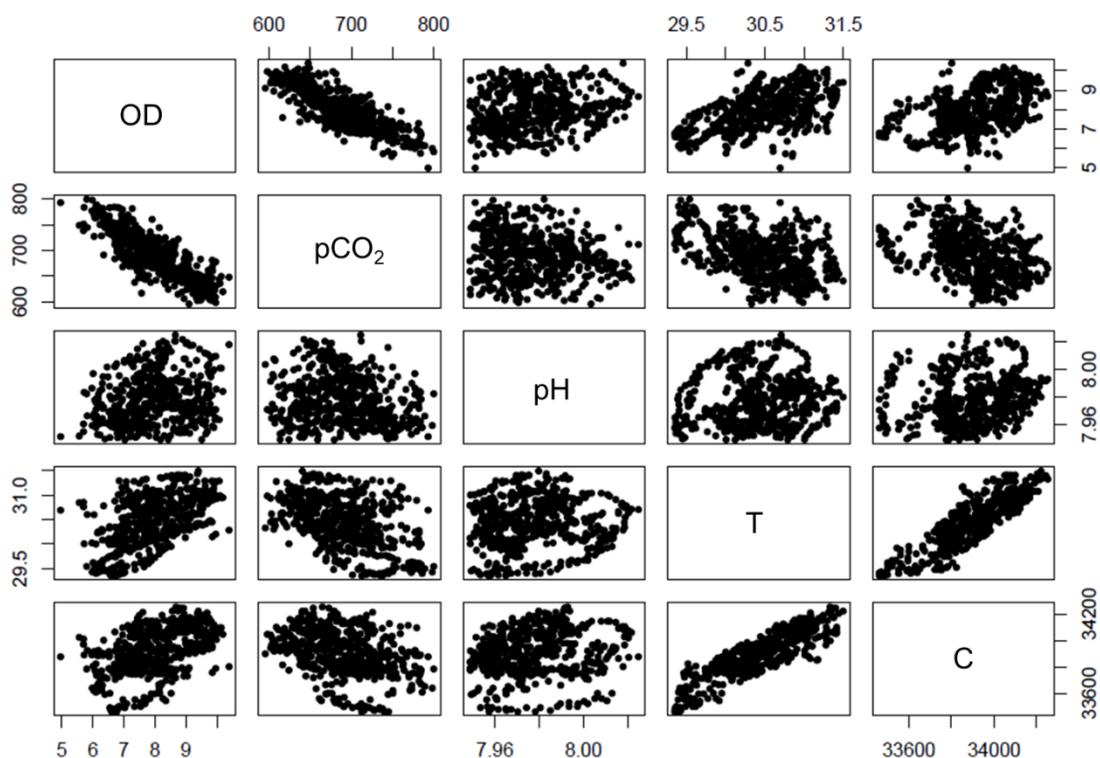


Figura 4.18. Gráfico de correlación de la base de datos del periodo de estudio de septiembre de 2016. OD: oxígeno disuelto (mg/L),  $p\text{CO}_2$  ( $\mu\text{atm}$ ), T: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), C: conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

#### 4. 5. Estados de saturación de $\text{CaCO}_3$

Con los datos de septiembre de 2016, se calcularon la alcalinidad, el carbono inorgánico disuelto, el ion carbonato, el bicarbonato y los estados de saturación de calcita y aragonita mediante la función *carb* del paquete *seacarb*, para el cual se utilizaron los valores registrados de pH,  $p\text{CO}_2$  y temperatura, además de valores estándares de salinidad ( $S = 36$ ), presión atmosférica ( $P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm}$ ) y presión hidrostática ( $P = 0.5 \text{ bar}$ ). Tanto  $\Omega_{\text{calcita}}$  como la  $\Omega_{\text{aragonita}}$  presentaron una tendencia a disminuir a finales del periodo de estudio (Figura 4.19).

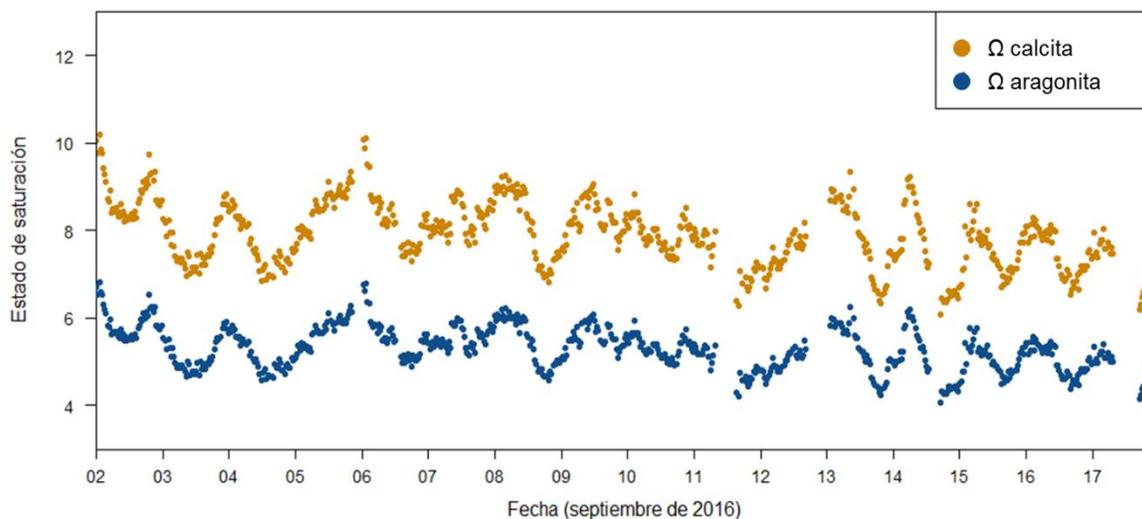


Figura 4.19. Estados de saturación de septiembre de 2016.

#### 4.5.1. Correlaciones con el sistema de carbonatos

Se realizó la correlación de las variables del sistema de carbonatos con la base de datos registrada en el observatorio costero de Puerto Morelos la cual consistió de 17 días de duración ( $n = 561$ ) (Figura 4.20), para lo cual se consideraron sólo la alcalinidad y  $\Omega_{\text{aragonita}}$ , ya que los demás parámetros presentaron correlaciones positivas muy altas entre sí ( $\rho > 0.90$ ) y comportamientos muy similares con las demás variables (colinealidad).

Se destaca la correlación positiva del pH con la alcalinidad ( $\rho = 0.51$ , valor  $p < 0.05$ ) y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  ( $\rho = 0.77$ , valor  $p < 0.05$ ), así como de la  $p\text{CO}_2$  con la alcalinidad ( $\rho = 0.71$ , valor  $p < 0.05$ ). Con las variables restantes, la temperatura presentó bajas correlaciones negativas, de las cuales la tendencia con  $\Omega_{\text{aragonita}}$  ( $\rho = -0.04$ , valor  $p < 0.05$ ) y la alcalinidad ( $\rho = -0.33$ , valor  $p < 0.05$ ) son mayores. El oxígeno disuelto y la conductividad no presentaron correlaciones significativas.

Tabla 4.5. Correlaciones  $\rho$  de Spearman de la base de datos del sistema de carbonatos. T: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $p\text{CO}_2$  ( $\mu\text{atm}$ ), alcalinidad ( $\text{mol/kg}$ ), OD: oxígeno disuelto ( $\text{mg/L}$ ), C: conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ). Los números en negritas indican las correlaciones estadísticamente significativas.

Variable	T	pH	$p\text{CO}_2$	Alcalinidad	$\Omega_{\text{aragonita}}$	OD	C
T	1.00	0.11	<b>-0.45</b>	-0.33	-0.04	<b>0.54</b>	<b>0.86</b>
pH	0.11	1.00	-0.17	<b>0.51</b>	<b>0.77</b>	0.29	0.19
$p\text{CO}_2$	<b>-0.45</b>	-0.17	1.00	<b>0.71</b>	0.41	<b>-0.81</b>	-0.42
Alcalinidad	-0.33	0.51	<b>0.71</b>	1.00	<b>0.90</b>	<b>-0.49</b>	-0.24
$\Omega_{\text{aragonita}}$	-0.04	<b>0.77</b>	0.41	<b>0.90</b>	1.00	0.19	-0.03
OD	<b>0.54</b>	0.29	<b>-0.81</b>	<b>-0.49</b>	0.19	1.00	<b>0.49</b>
C	<b>0.86</b>	0.19	-0.42	-0.24	-0.03	0.49	1.00

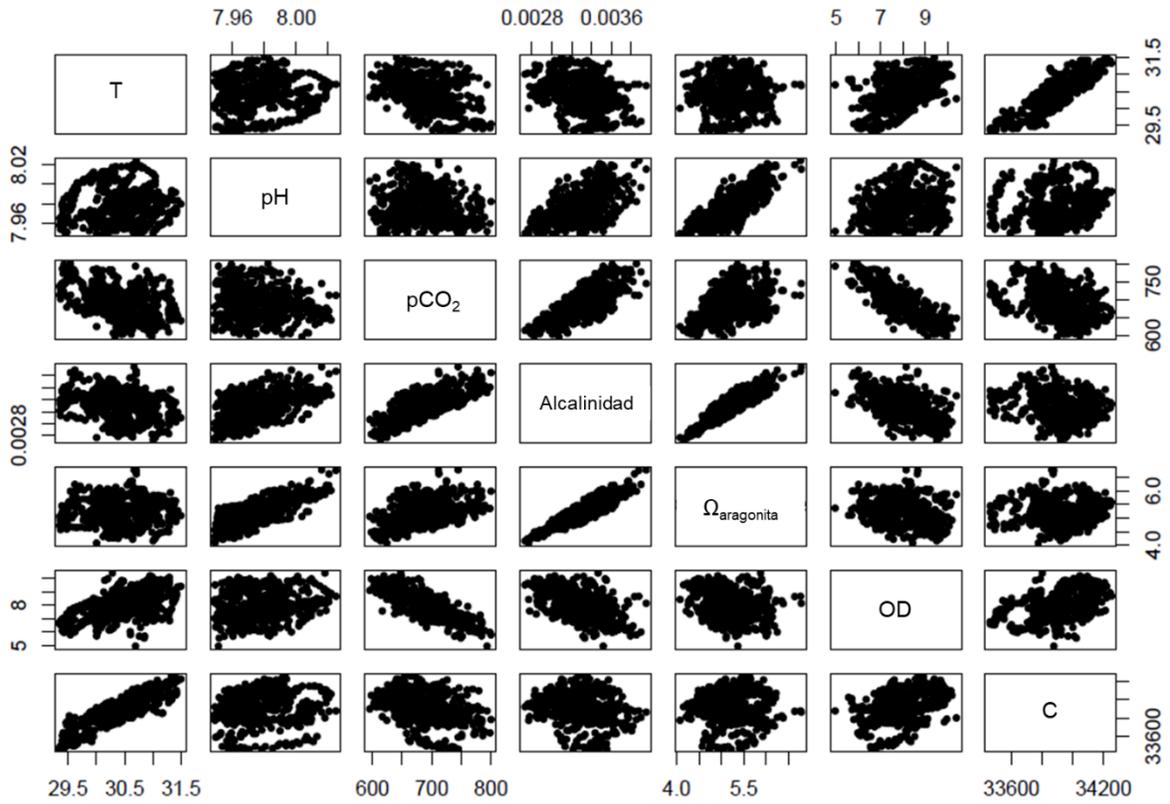


Figura 4.20. Gráfico de correlación de la base de datos del sistema de carbonatos T: temperatura (°C), pCO<sub>2</sub> (μatm), alcalinidad (mol/kg), OD: oxígeno disuelto (mg/L), C: conductividad (μS/cm).

## 5. Discusión

### 5.1. Variabilidad del pH

La serie de pH que se obtuvo posee una alta frecuencia temporal (30 minutos) durante un periodo de 14 meses en dos sensores colocados en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Se calculó la variabilidad de la serie completa de pH para conocer su comportamiento estacional, así como para observar procesos de escala temporal de un año. Por otra parte, se descompuso la serie temporal en el periodo de estudio para observar los cambios diarios que afectan al pH. Es probable que esta serie sea la de mayor longitud obtenida hasta la fecha en el Mar Caribe y con toda seguridad en el Caribe Mexicano.

#### 5.1.1. Variabilidad diaria

En septiembre de 2016 se identificaron ciclos diarios de pH que probablemente son influenciados por los cambios de la  $p\text{CO}_2$ . Por otra parte, se observa también el incremento de oxígeno por la producción autótrofa durante el día y su posterior disminución debido posiblemente a la respiración de los organismos heterótrofos que liberan  $\text{CO}_2$  desde la tarde hasta la noche, así como por la degradación de la materia orgánica. Mediante estos ciclos diarios, se observó que el pH y el OD presentaron comportamientos similares con respecto a la  $p\text{CO}_2$ . A pesar de ello, los resultados que se adquirieron mostraron una correlación muy baja entre el pH y el OD ( $\rho = 0.26$ , valor  $p < 0.05$ ) por lo que no se puede afirmar que el cambio de OD sea el único factor que influya sobre los cambios de pH. El patrón del pH también puede estar afectado por los cambios en la tasa de disolución del  $\text{CO}_2$ , puesto que durante el día la elevada temperatura del agua reduce su disolución mientras que en la noche ocurre lo contrario, pues una menor temperatura mejora la disolución del  $\text{CO}_2$  (Kerrison *et al.*, 2011).

A pesar de que la respiración disminuye al pH, en este trabajo se observó que la correlación más alta del pH fue con el sistema de carbonatos, el cual cambia por los procesos de disolución biogeoquímica y remineralización, así como por los afloramientos, los patrones de circulación y el régimen de mareas que induce corrientes que pueden provocar cambios en los intervalos de OD y temperatura (Price *et al.*, 2012), el cual es mixto y semidiurno en Puerto Morelos (se presentan dos pleamares y dos bajamares diariamente) (Merino Ibarra y Otero Dávalos, 1983). La gran cantidad de procesos costeros y de organismos presentes en los arrecifes de coral provocan una mayor variabilidad diaria de los parámetros físicos, químicos y biológicos (Kerrison *et al.*, 2011).

Cabe resaltar que la baja correlación del pH con los otros parámetros como el OD y el  $p\text{CO}_2$  demuestra la posibilidad de una interacción muy compleja entre los parámetros físico-químicos marinos con el sistema de carbonatos, ya que se observó que el pH así como la alcalinidad y los estados de saturación de  $\text{CaCO}_3$  no tienen alguna relación directamente proporcional o inversa (mayor a  $\pm 0.8$ ) con las variables medidas en el estudio.

### 5.1.2. Variabilidad anual

La serie presenta los máximos de variabilidad en noviembre (0.47%) y diciembre (0.52%) de 2017, cuando la mediana del pH disminuye de 8.00 a 7.92 unidades y se presenta el valor mínimo de 7.90. Esta variabilidad contrasta con la de noviembre de 2016 (0.35%) donde la mediana del pH es similar pero sus intervalos difieren de los de 2017. Asimismo, la variabilidad de septiembre y octubre es mayor en el 2017 que en el 2016. Durante el 2017 el pH presenta una baja variabilidad en primavera y verano (de marzo a agosto) y una alta variabilidad en otoño e invierno (de septiembre a febrero), lo que refleja la posibilidad de que se presenten dos patrones estacionales al año.

El pH puede incrementar debido a una mayor cantidad de OD producido por organismos fotosintéticos marinos así como por la fotosíntesis terrestre y al incremento de la radiación solar durante el verano, lo cual favorece el aumento de la temperatura del agua lo que reduce la solubilidad del CO<sub>2</sub> (Wootton *et al.*, 2008). Por el contrario, el pH puede disminuir por los afloramientos locales que contengan altas cantidades de CO<sub>2</sub> y de forma puntual, durante los flujos masivos de sargazo que han llegado recientemente al Mar Caribe. Desde el 2011 se ha reportado la llegada de *Sargassum* spp. del cual se han logrado identificar las especies *Sargassum fluitans* y *S. natans* (Franks *et al.*, 2011; Tussenbroek *et al.*, 2017). Tussenbroek *et al.* (2017) estudiaron los eventos de sargazo en Quintana Roo desde el año 2013 hasta el 2016.

Un ejemplo importante fue el evento de junio y agosto de 2015, durante el cual se acumularon en promedio 9,726 m<sup>3</sup> por mes por km de línea de costa, una cantidad inusual, toda vez que el sargazo se presentaba en cantidades menores y en intervalos irregulares. Tussenbroek *et al.* (2017) reportaron que durante el evento de 2015 en la laguna arrecifal de Puerto Morelos el impacto fue menor que en otras zonas costeras de Quintana Roo. A pesar de ello el OD se mantuvo en 5 mg/L aproximadamente durante un ciclo de 24 horas, lo que incrementó la eutrofización y disminuyó el pH dado que las mareas de sargazo contienen grandes cantidades de materia orgánica, por lo que su llegada a la playa y posterior descomposición produce altas cantidades de ácido sulfhídrico, condiciones de hipoxia así como un aumento del CO<sub>2</sub> (Arellano-Verdejo *et al.*, 2019; Cabanillas-Terán *et al.*, 2019; Tussenbroek *et al.*, 2017). En septiembre de 2016 Tussenbroek *et al.* (2017) observaron que la laguna arrecifal de Puerto Morelos todavía presentaba eutrofización. Posteriormente de 2016 a 2017 el flujo de sargazo disminuyó considerablemente, en cambio, en 2018 y a inicios del 2019 volvió a incrementar (Cabanillas-Terán *et al.*, 2019).

Otro aspecto que se puede considerar es la contaminación causada por la descarga de agua subterránea a la zona costera que ocurre de manera natural. En la Península de Yucatán se presentan altas tasas de infiltración y de flujos hacia los acuíferos que los hacen vulnerables a la contaminación por fertilizantes o de aguas residuales no tratadas que se filtran desde los fosos sépticos. Con el tiempo, estos flujos aumentan la posibilidad de eutrofizar la zona costera (Null *et al.*, 2014).

La variabilidad temporal de alta frecuencia y larga duración tanto para el pH como para el sistema de carbonatos, especialmente en arrecifes coralinos, ha sido difícil de documentar (Price *et al.*, 2012) hasta recientemente. Los sensores de pH, como el *SeaFET*, junto a los sensores de pCO<sub>2</sub> han permitido aumentar la cantidad de estudios relacionados con la acidificación del océano (*e.g.* Kapsenberg y Hofmann, 2016; Kerrison *et al.*, 2011; Price *et al.*, 2012) por su ventaja contra la medición de alcalinidad total y el carbono inorgánico disuelto, que se obtienen con muestras discretas de agua que aunque son precisas y exactas, tienen una baja frecuencia temporal y resolución espacial (Price *et al.*, 2012).

## 5.2. Valores extremos

Los datos registrados en el observatorio costero (con excepción de la conductividad) se encuentran dentro de los intervalos normales para cada variable en la mayoría de los casos, aunque se registraron valores extremos que sobresalen como el mínimo de OD, el máximo y el mínimo de pH y los altos valores de pCO<sub>2</sub> (Tabla 5.1). Estas condiciones indican la presencia de fuentes importantes de CO<sub>2</sub> en la columna de agua, el cual puede tener su origen ya sea por la degradación de la materia orgánica (MO) proveniente del fitoplancton y de las excreciones de los organismos marinos (Millero, 2013), de la re suspensión del sedimento que se pueda presentar en la laguna arrecifal o bien, por la alta respiración biológica. Dado que no se midieron estos parámetros, existe incertidumbre sobre la fuente principal de CO<sub>2</sub> en la zona de estudio.

Tabla 5.1. Estadística básica de las series temporales del Observatorio Costero de Puerto Morelos. OD: oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>: presión parcial de dióxido de carbono.

Variable	Fecha inicial	Fecha final	Mínimo	Media	Mediana	Máximo
OD (mg/L)	2016-06-27	2017-08-14	0.81	7.28	7.43	10.91
pCO <sub>2</sub> (µatm)	2016-08-31	2016-09-22	593.6	689.4	689.0	805.8
pH	2016-09-03	2017-12-31	7.83	7.98	7.99	8.11
Conductividad (µS/cm)	2016-05-27	2017-08-14	30599	34797	34536	39326
Temperatura (°C)	2016-05-27	2018-07-24	25.48	28.30	28.21	31.89

En la serie de OD se registraron periodos de hipoxia (< 2 mg/L) entre mayo y junio de 2016, con un mínimo de 0.81 mg/L del 3 de junio al 14 de junio; también en ese mes la temperatura fue menor (28.47°C) en comparación con la mediana de los otros meses de verano de ese año, esto sugiere la posible presencia de un afloramiento. Los afloramientos transportan agua de una mayor profundidad con altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, una mayor salinidad, menor temperatura y poco oxígeno que provoca eventos de hipoxia (Frieder *et al.*, 2012) con valores similares a los registrados en junio. Además transportan una gran cantidad de nutrientes que provocan después de un cierto tiempo florecimientos de fitoplancton, los cuales tienden a aumentar el pH, el OD y disminuir el pCO<sub>2</sub> (Kapsenberg y Hofmann, 2016).

En el área de estudio solo hay un evento documentado que señala la disminución puntual de OD. Merino Ibarra y Otero Dávalos (1983) registraron un mínimo de 2.31 mg/L durante la madrugada frente a la Estación “Puerto Morelos” del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, cerca de la orilla, que atribuyeron a una pequeña columna de agua y la alta presencia de detritus. En este trabajo el sensor se encontraba a una mayor profundidad (5 m) en la laguna arrecifal y se

registraron valores menores a 1 mg/L, por lo que se puede descartar que la disminución ocurrió por las mismas causas descritas en el evento de 1983.

El máximo de pH se registró en noviembre de 2017 (pH de 8.11) y el mínimo en febrero de ese mismo año (pH de 7.83), la media y la mediana más bajas se registraron en diciembre de 2017 (ambas de 7.92). El promedio de pH fue de 7.98, menor a la media registrada por Merino Ibarra y Otero Dávalos (1983) de 8.34. Es probable que intervalo de pH que se midió en este trabajo se encuentre dentro de los valores normales teniendo en cuenta que el IPCC reportó que el pH global superficial ha disminuido de 8.2 a 8.1, con una reducción media de 0.08 unidades de 1765 a 1994. De acuerdo con estos datos se prevé que para finales del siglo XXI el pH del océano superficial disminuya de 0.06 a 0.07 unidades (IPCC, 2014). Las medidas realizadas con el inventario de CO<sub>2</sub> antropogénico global del estudio de series temporales de Atlántico Bermudas (BATS, por sus siglas en inglés), indican que el pH del Atlántico Norte ha presentado la reducción más alta de pH ( $-0.0019 \pm 0.0001$  unidades de pH por año de 1983 a 2009) por la mayor acumulación de CO<sub>2</sub> antropogénico (Rhein *et al.*, 2013).

### 5.3. Estados de saturación de CaCO<sub>3</sub>

Los estados de saturación de calcita y aragonita que se obtuvieron son los primeros registros de alta resolución temporal calculados a partir de sensores *in situ* para la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Los estados de saturación tuvieron una alta correlación positiva con el pH, lo que se ve reflejado tanto en su tendencia a disminuir durante el periodo de estudio como en los ciclos diarios. Es probable que los altos valores de  $\Omega_{\text{calcita}}$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  se presenten por las condiciones del ambiente costero, puesto que el pH y los valores del ion carbonato son mayores en zonas poco profundas y productivas que retienen altas cantidades de CO<sub>2</sub> (Feely *et al.*, 2009).

Se sugiere que los valores mínimos que se registraron para  $\Omega_{\text{calcita}}$  (6.18) y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  (4.15) son mayores a los calculados para el Atlántico Norte (Tabla 5.2), no obstante, es necesario obtener una serie de mayor duración para confirmar este hecho. Los valores promedio fueron más altos que los obtenidos en un estudio en Puerto Rico, en otro estudio realizado a través del Mar Caribe, así como en comparación con los valores promedio de los océanos. Esto es debido a que  $\Omega_{\text{calcita}}$  es cercano a 5.0 (varía de 3.8 a 5.9) y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  cercano a 3.0 (varía de 2.4 a 3.9) (Millero, 2013), con excepción del Ártico, que tiene los estados de saturación más bajos, seguido por el Océano del Sur, el Pacífico Norte y el Atlántico Norte.

Es importante destacar factores que posiblemente incrementaron los valores de los estados de saturación en Puerto Morelos en comparación con los estudios realizados en el Mar Caribe, como i) la cercanía a la costa: el estudio de Puerto Rico por Gray *et al.*, (2012) se elaboró en un área distante de la zona costera, por otra parte, Gledhill *et al.*, (2008) obtuvieron muestras discretas que se tomaron durante campañas oceanográficas a través de una amplia zona del Caribe o ii) la influencia de la plataforma carbonatada de la Península de Yucatán la cual favorece la concentración de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

La tendencia calculada para  $\Omega_{\text{aragonita}}$  por BATS es de  $-0.0125 \pm 0.0013$  por año de 1995 a 2009, la cual es alta en comparación de otras medidas como la de la estación en Hawái de Evaluación de un Hábitat Oligotrófico a Largo Plazo (ALPHA, por sus siglas en inglés), la Estación Europea para Series de Tiempo (ESTOC) y la del Mar de Islandia (IS) (Rhein *et al.*, 2013), lo que indica una mayor acidificación en el Atlántico Norte y el favorecimiento de la disolución de las estructuras formadas con CaCO<sub>3</sub>.

Tabla 5.2. Valores promedio de los estados de saturación de calcita y aragonita a nivel mundial y del Mar Caribe.

Zona	Región	$\Omega_{\text{aragonita}}$	$\Omega_{\text{calcita}}$	Referencia
Océano	Ártico	$2.41 \pm 0.3$	$3.82 \pm 0.4$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Atlántico Norte	$3.47 \pm 0.6$	$5.31 \pm 0.8$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Atlántico Sur	$3.70 \pm 0.4$	$5.63 \pm 0.5$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Pacífico Norte	$3.30 \pm 0.7$	$5.04 \pm 0.9$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Pacífico Sur	$3.52 \pm 0.4$	$5.36 \pm 0.6$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Índico Norte	$3.94 \pm 0.2$	$5.93 \pm 0.3$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	Índico Sur	$3.59 \pm 0.4$	$5.46 \pm 0.5$	Feely <i>et al.</i> (2009)
	del Sur	$3.02 \pm 0.9$	$4.64 \pm 1.3$	Feely <i>et al.</i> (2009)
Mar Caribe		$4.01 \pm 0.17$	NA	Gledhill <i>et al.</i> (2008)
	Puerto Rico	$3.94 \pm 0.24$	$5.90 \pm 0.36$	Gray <i>et al.</i> (2012)
	Puerto Morelos	$5.39 \pm 0.48$	$8.03 \pm 0.72$	

### 5.3.1. Efectos de la acidificación oceánica en la calcificación

En Puerto Morelos los valores calculados de  $\Omega_{\text{calcita}}$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  se encuentran dentro del intervalo de condiciones óptimas para la precipitación biogénica de los minerales de  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega > 3$ ) (reportados en estudios de Gattuso *et al.*, 1998). En general, el agua superficial del océano está supersaturada respecto a los minerales de  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega > 1$ ) pero cuando los estados de saturación caen por debajo del nivel de saturación ( $\Omega < 1$ ) los biominerales de carbonato en conchas y esqueletos comienzan a disolverse (Feely *et al.*, 2010; Gattuso *et al.*, 1998; Takahashi *et al.*, 2014), condiciones que no se presentaron durante el periodo de estudio, lo cual justifica un monitoreo continuo de estos parámetros en el ambiente oceánico.

Durante el periodo de estudio (17 días) el promedio de la concentración  $\text{CO}_3^{2-}$  fue de  $3.3 \times 10^{-4}$  mol/kg (con una variación de  $4.3 \times 10^{-4}$  a  $2.5 \times 10^{-4}$  mol/kg). Si la concentración de  $\text{CO}_3^{2-}$  es menor a  $6.6 \times 10^{-5}$  mol/kg, ocurre la subsaturación de aragonita y las tasas de calcificación disminuyen (Feely *et al.*, 2009; Kleypas *et al.*, 1999) lo que provoca daños severos a los organismos calcificadores. La calcificación es un proceso que depende de la concentración de  $\text{CO}_3^{2-}$  y de  $\text{Ca}^{2+}$  (Feely *et al.*, 2009; Raven *et al.*, 2005), varía en función de los estados de saturación durante el día y está fuertemente relacionada con la fotosíntesis ya que las zooxantelas simbiotas de los corales, algas calcificadoras y las comunidades de los arrecifes de coral aumentan sus tasas de deposición de  $\text{CaCO}_3$  en los periodos de luz (Leclercq *et al.*, 2002).

Se ha reportado una disminución de la calcificación de corales, cocolitofóridos y foraminíferos del 5–25% en respuesta al incremento de  $\text{CO}_2$  antropogénico desde la era industrial (de 280 a 560 ppm) (Raven *et al.*, 2005). Los efectos de la acidificación oceánica han sido estudiados en diversos organismos, en general se ha observado que los corales, las comunidades de los arrecifes de coral y los organismos planctónicos disminuyen sus tasas de calcificación y de su metabolismo (Doney *et*

al., 2009; Wood *et al.*, 2008), provocando que la cobertura coralina disminuya incluso al grado de desaparecer, además debilita las estructuras de los esqueletos de carbonato favoreciendo su erosión y disolución, como sucede con los pterópodos, los cuales precipitan aragonita (Raven *et al.*, 2005). Es importante resaltar que los organismos que precipitan las formas más solubles de  $\text{CaCO}_3$  (como la calcita de magnesio) son menos resilientes a la acidificación oceánica que los que precipitan las formas más estables (Price *et al.*, 2012).

Además de la calcificación, se han presentado tasas bajas de crecimiento y de fertilización de algunas especies marinas a causa de la acidificación oceánica. Albright *et al.*, (2010) demostraron que la especie de coral del Mar Caribe *Acropora palmata* tiene afectaciones en tres fases de su vida al estar expuesta a condiciones de  $\text{pCO}_2$  de 500 a 800  $\mu\text{atm}$ : i) la fertilización disminuye entre 12–13% lo que disminuye la cantidad de larvas, ii) su asentamiento disminuye 45–69% y iii) su crecimiento disminuye. Así como el éxito de fertilización disminuye para los corales, lo mismo ocurre con otros invertebrados marinos, como ostras y erizos de mar.

## 5.4. Análisis de factores

Se realizó un análisis de factores con rotación ortogonal *varimax* para la base de datos del sistema de carbonatos. Inicialmente se utilizaron 11 variables, de las cuales se eliminaron los estados de saturación de  $\text{CaCO}_3$  por su alta correlación con los otros parámetros del sistema de carbonatos ( $\rho > 0.96$ ). La matriz que se utilizó fue de 9 variables y 561 observaciones (sin considerar la fecha), la cual se muestra en el Anexo 8.1 en donde se incluye la fecha de las mediciones. Por la cantidad de variables, se extrajeron 5 factores, de los cuales, son interpretables los factores 1, 2 y 3 porque la varianza total de sus eigenvalores fue de 85% y sus valores mayores a 1 (Figura 5.1). El análisis de factores fue estadísticamente significativo (valor  $p < 0.05$ ).

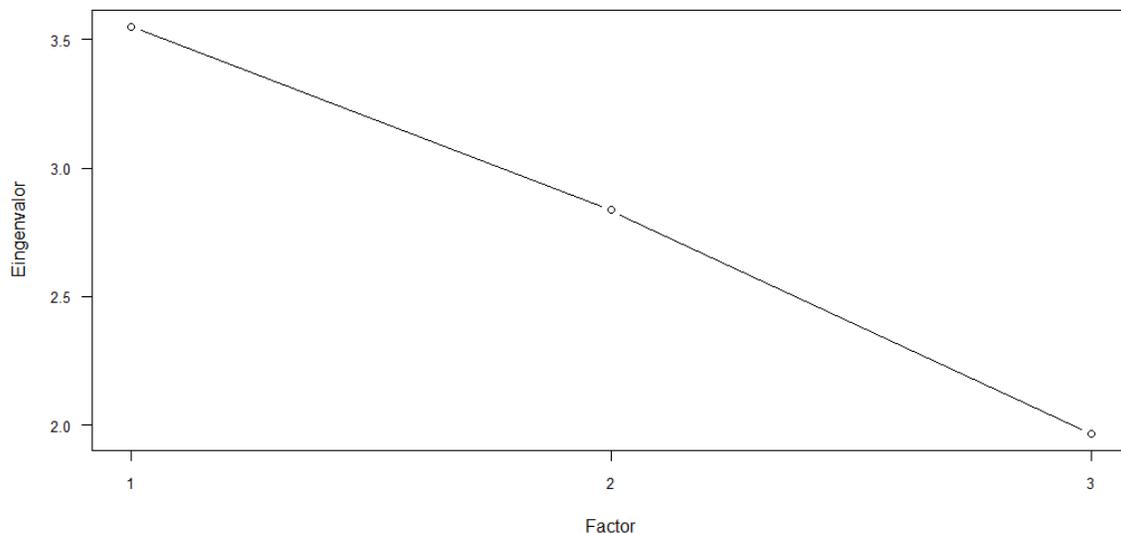


Figura 5.1. Gráfica de sedimentación de los eigenvalores obtenidos del análisis de 3 factores.

Se examinó la matriz de cargas obtenida de los factores (Tabla 5.3) donde los valores se encuentran en el intervalo de 1 a  $-1$ . Los valores cercanos a los límites indican la influencia del factor en la variable, en este trabajo se consideraron los valores a partir de  $\pm 0.7$  para definir los factores. Las variables con valores más altos en el factor 1 fueron la alcalinidad, el  $\text{CO}_3^{2-}$ , el DIC, el  $\text{HCO}_3^-$  y el pH, lo que representa al sistema de carbonatos; en el factor 2 el OD y la  $\text{pCO}_2$ , y en el factor 3 la temperatura y la conductividad.

Tabla 5.3. Matriz de cargas de los factores rotados con varimax de la base de datos del sistema de carbonatos. Los números en negritas indican las correlaciones mayores a  $\pm 0.7$  consideradas como estadísticamente significativas.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Temperatura	-0.071	-0.260	<b>0.906</b>
Conductividad	0.020	-0.189	<b>0.925</b>
pH	<b>0.893</b>	-0.357	0.082
$\text{pCO}_2$	0.233	<b>0.909</b>	-0.237
$\text{HCO}_3^-$	<b>0.731</b>	0.630	-0.207
$\text{CO}_3^{2-}$	<b>0.948</b>	0.262	0.057
DIC	<b>0.772</b>	0.591	-0.174
OD	-0.052	<b>-0.817</b>	0.364
Alcalinidad	<b>0.813</b>	0.544	-0.139

De acuerdo con estos resultados, el factor 1 se nombró como “sistema de carbonatos”, el factor 2 “fotosíntesis–respiración marina” y el factor 3 como “masas de agua”. Se concluyó que estos son los tres factores que dominan el sistema de carbonatos en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. En la Tabla 5.4 se indica que el “sistema de carbonatos” presentó el mayor porcentaje de varianza proporcional. Otro aspecto que se obtuvo fue que los factores de “sistema de carbonatos” y “fotosíntesis–respiración marina” explican el 70.9% de la varianza total de las variables.

Tabla 5.4. Varianza proporcional y acumulativa de cada factor.

Varianza (%)	Sistema de carbonatos	Fotosíntesis–respiración marina	Masas de agua
Proporcional	39.4	31.5	21.9
Acumulativa	39.4	70.9	0.92

Mediante la rotación “varimax” se observó la correlación más alta de ciertas variables a un solo factor. Se graficaron los tres factores obtenidos en dos figuras con la finalidad de distinguir a las variables y su comportamiento en cada uno, tales que i) en la Figura 5.2, así como en la Figura 5.3 las variables de alcalinidad, el  $\text{CO}_3^{2-}$ , el DIC, el  $\text{HCO}_3^-$  y el pH se encontraron agrupadas sobre el Factor 1 el cual es el eje horizontal, ii) en la Figura 5.2 se observó que el OD y la  $\text{pCO}_2$  se encuentran de forma opuesta

sobre el Factor 2 que es el eje vertical y por último, iii) en la Figura 5.3 la temperatura y la conductividad se observaron con mayor claridad sobre el Factor 3.

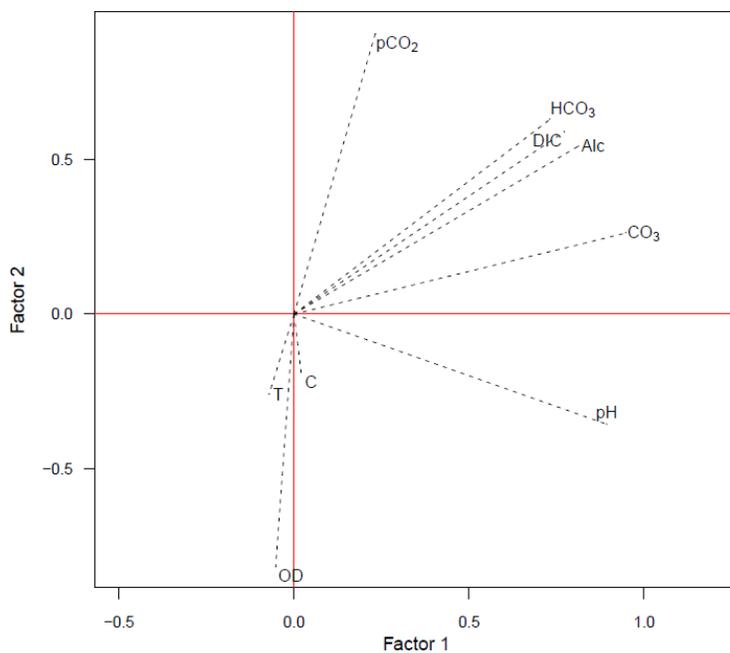


Figura 5.2. Gráfica de las cargas de los factores 1 y 2 con rotación varimax. Alc: alcalinidad, C: conductividad, DIC: carbono inorgánico disuelto, OD: oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>: presión parcial de CO<sub>2</sub>, T: temperatura.

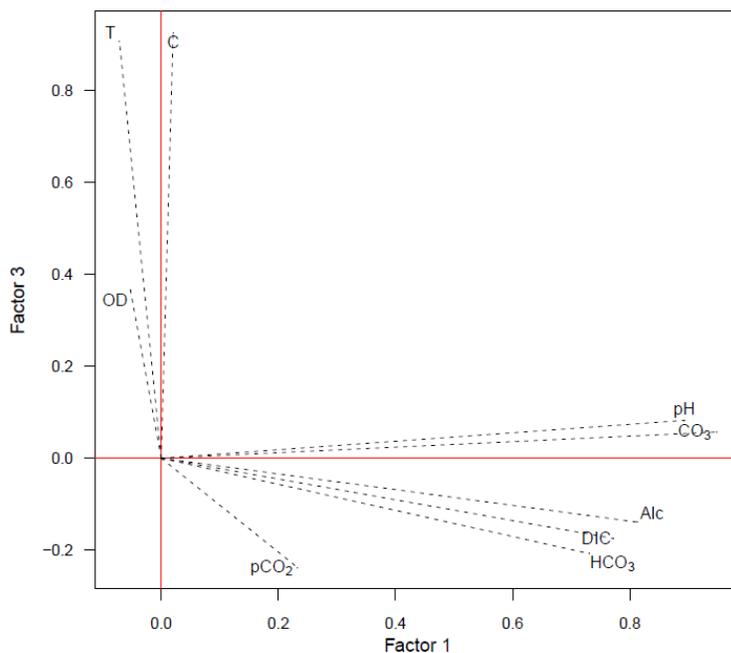


Figura 5.3. Gráfica de las cargas de los factores 1 y 3 con rotación varimax. Alc: alcalinidad, C: conductividad, DIC: carbono inorgánico disuelto, OD: oxígeno disuelto, pCO<sub>2</sub>: presión parcial de CO<sub>2</sub>, T: temperatura.

## 5.5. Limitaciones

A pesar de sus limitaciones, las mediciones que se obtuvieron en el observatorio costero fueron suficientes para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, en vista de que son los primeros registros continuos y de alta frecuencia de pH, así como de un periodo del sistema de carbonatos que se tienen para la laguna arrecifal de Puerto Morelos, con lo que se puede estudiar el ciclo del pH de forma interanual, su tendencia, las condiciones que existen en la laguna arrecifal además de observar la respuesta del ecosistema frente a la acidificación.

Entre las limitaciones más importantes de este estudio se encuentran las dificultades que presentaron los sensores, principalmente el de  $p\text{CO}_2$ , cuya serie era necesaria para conocer mejor el comportamiento del sistema de carbonatos. La serie de  $p\text{CO}_2$  presentó los intervalos más amplios sin mediciones por el incorrecto funcionamiento del sensor debido, por un lado, a la formación natural de una biopelícula sobre la membrana de transferencia de gases y, por otra parte, a los daños a la membrana causados por los rápidos cambios de las condiciones del medio, que provocaron la entrada de agua en el instrumento. Este hecho evitó que se obtuvieran los estados de saturación de  $\text{CaCO}_3$  durante un periodo mayor a los 17 días de septiembre de 2016 y que se observara el cambio del sistema con otras variables como el pH.

Asimismo, la falta de información del sensor de OD impidió comparar la disminución del pH que se presentó en junio y agosto de 2017 con los procesos de fotosíntesis, respiración, cantidad de materia orgánica o surgencias, ya que ambas variables están relacionadas a ellos, así como al  $p\text{CO}_2$ . Este problema también se reflejó en la baja correlación entre el OD y pH, la cual se esperaba que fuera mayor porque sus ciclos son muy similares.

Otra limitante fue el sensor de pH que presentó una deriva evitando obtener una serie completa de dos años y además se tuvo un mes sin datos (diciembre de 2016), lo cual habría sido útil para observar la variabilidad estacional con mayor detalle. Aunque se tenía otro sensor colocado en otra estación, su tiempo de medición era menor y tenía una alta cantidad de huecos, por lo que se decidió utilizar el registro más completo.

La calibración del sensor de conductividad también fue una limitante para el estudio, debido a que impidió utilizar datos reales de salinidad en la obtención de los estados de saturación. A pesar de que la conductividad se correlaciona muy poco con el sistema de carbonatos, su correlación con la  $p\text{CO}_2$  es mayor, lo que podría haber dado más información sobre esta variable. Además, los registros del sensor presentaron periodos largos vacíos, lo que impidió observar los patrones de precipitación o los cambios de masas de agua con mayor detalle. Aparte de la información registrada por los sensores marinos, no se obtuvo un registro de las condiciones meteorológicas que afectan directamente a las variables marinas, principalmente de la precipitación, ya que no se consideró dentro de los objetivos del estudio.

## 5.6. Perspectivas

Se espera que los datos registrados en el observatorio costero tengan más duración para estudiar con mayor detalle temporal una gran cantidad de procesos costeros asociados al cambio global. Para ello es necesario que se logre incrementar la cantidad de sensores en las estaciones de la laguna arrecifal

para comparar las condiciones entre cada una y complementar información si se presenta alguna falla en los sensores, así como la cantidad de variables que afectan al medio e indican con mayor claridad procesos de surgencias y eventos importantes como la llegada masiva de sargazo cuyas fuertes implicaciones en el ambiente marino como la hipoxia y la anoxia pueden desembocar en la alta mortalidad de especies.

Para conocer el origen del  $\text{CO}_2$  en la columna de agua, se deberían añadir medidas de la degradación de materia orgánica mediante variables como la demanda biológica de oxígeno (DBO), que mide la cantidad de oxígeno necesaria requerida por microorganismos para oxidar residuos orgánicos de modo aerobio. La DBO se determina con una muestra en una botella cerrada a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  en un tiempo de 5 días y se expresa en mg/L (Raffo Lecca y Ruiz Lizama, 2014). De igual manera, la demanda química de oxígeno (DQO) que indica el contenido de materia orgánica en aguas residuales o urbanas (Raffo Lecca y Ruiz Lizama, 2014) podría ayudar a confirmar en qué cantidad llega agua subterránea contaminada a la laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Por otra parte, hace falta observar los cambios de las condiciones fisicoquímicas del océano con respecto a eventos meteorológicos a los que Puerto Morelos está expuesto, tales como tormentas tropicales, nortes y huracanes, cuya temporada inicia el 1 de junio y termina el 30 de noviembre. Estos eventos provocan periodos de intensa precipitación en la región, con lo cual se puede completar información para estudiar la dinámica entre las variables del sistema atmósfera-océano.

Es de gran importancia que este tipo de registros sean lo suficientemente largos para poder analizar las tendencias de los parámetros que están fuertemente asociados a la acidificación oceánica en México, dado que la información de los ciclos anuales del pH y de  $\text{pCO}_2$  es escasa en regiones altamente productivas, como los arrecifes de coral.

## 6. Conclusiones

Se recopilaron datos *in situ* de cinco variables oceanográficas en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. La variable más larga que se registró fue la temperatura que reflejó la estacionalidad durante dos años, seguida de la serie temporal de pH, la cual es el primer registro de alta resolución temporal (30 minutos) y larga duración (16 meses) en el Caribe mexicano que se midió con el sensor *SeaFET*. En la serie de pH con valores aceptados se observaron valores mensuales promedio que oscilaron entre 7.92 a 8.00 con un mínimo de 7.83 y un máximo de 8.11, intervalo que indica condiciones normales del pH del océano. El pH presenta ciclos diarios que varían de forma similar al oxígeno, el cual puede ser afectado principalmente por la fotosíntesis y la respiración de los organismos, aunque no es posible explicar el comportamiento del pH basado únicamente en el OD. Por otra parte, se presentaron eventos de hipoxia entre mayo y junio de 2016, donde se llegaron a registrar valores menores a 1 mg/L.

Se encontró que la principal correlación del pH con los parámetros medidos y calculados del sistema de carbonatos fue con los estados de saturación de  $\text{CaCO}_3$ , resultado muy similar al que se obtuvo con el análisis de factores, en el cual el pH forma parte del Factor 1 “sistema de carbonatos”. Se observó una alta correlación negativa del oxígeno disuelto con la  $\text{pCO}_2$ , que se observó también en el análisis de factores como el Factor 2 “fotosíntesis–respiración marina” y la alta correlación positiva entre temperatura y conductividad que eran el Factor 3 “masas de agua”. Se concluyó que estos procesos son los que dominan el sistema de carbonatos en el área de estudio.

Se obtuvieron los estados de saturación de carbonato de calcio para el mes de septiembre de 2016, de los cuales no existe un registro similar para Puerto Morelos, con lo que fue posible observar sus variaciones diarias y que cambiaron rápidamente, ya que a principios de septiembre  $\Omega_{\text{calcita}}$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}$  presentaron valores altos ( $\Omega_{\text{calcita}}=10.36$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}=6.93$ ) que después de 17 días presentaron valores mínimos cercanos a los valores normales de los estados de saturación ( $\Omega_{\text{calcita}}=6.18$  y  $\Omega_{\text{aragonita}}=4.15$ ), más parecidos a los registrados por otros estudios en otras zonas del Caribe. La principal limitación para obtener los estados de saturación de  $\text{CaCO}_3$  durante el tiempo de medición de pH fue por la falta de datos de  $\text{pCO}_2$ , cuyo sensor (*MiniCO<sub>2</sub>*) funcionó de forma incorrecta el resto del tiempo.

Se espera que el observatorio costero siga funcionando durante al menos 30 años (considerando que para el 2050 se espera un mayor impacto del cambio global), con el fin de recopilar los datos necesarios y de buena calidad para tener una climatología completa y de alta resolución del sistema de carbonatos principalmente del pH. Con ello, se lograría una mayor profundización de conocimiento en el país sobre la acidificación oceánica y se aportaría conocimiento que refuerce las medidas contra el cambio climático y el cuidado de los arrecifes del Caribe mexicano (que proveen de muchos servicios ecosistémicos como el turismo y la protección contra huracanes, además de ser altamente relevantes económicamente). Se espera que este estudio se expanda a las costas del Pacífico Mexicano en el futuro próximo. Estos datos serán reportados como indicadores del proyecto de Naciones Unidas “Objetivos de desarrollo sostenible”, objetivo 14 “Vida Submarina”, meta 14.3 “Minimizar y afrontar los impactos de la acidificación marina, incluyendo una mejor cooperación científica a todos los niveles”, indicador 14.3.1 “Acidez marina (pH) media medida en un conjunto acordado de estaciones de muestreo representativa”.

## 7. Referencias

- Albright, R., Mason, B., Miller, M. y Langdon, C. (2010). Ocean acidification compromises recruitment success of the threatened Caribbean coral *Acropora palmata*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20400–20404.
- Anagnostou, E., John, E. H., Edgar, K. M., Foster, G. L., Ridgwell, A., Inglis, G. N., ... Pearson, P. N. (2016). Changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration was the primary driver of early Cenozoic climate. *Nature*, 533(7603), 380–384.
- Arellano-Verdejo, J., Lazcano-Hernandez, H. E. y Cabanillas-Terán, N. (2019). ERISNet : deep neural network for *Sargassum* detection along the coastline of the Mexican Caribbean. *PeerJ*, 7(e6842), 1–19.
- Cabanillas-Terán, N., Hernández-Arana, H. A., Ruiz-Zárate, M. A., Vega-Zepeda, A. y Sanchez-Gonzalez, A. (2019). *Sargassum* blooms in the Caribbean alter the trophic structure of the sea urchin *Diadema antillarum*. *PeerJ*, 7(e7589), 1–32.
- Cetz-Navarro, N. P., Espinoza-Avalos, J., Sentíes-Granados, A. y Quan-Young, L. I. (2008). Nuevos registros de macroalgas para el Atlántico mexicano y riqueza florística del Caribe mexicano. *Hidrobiológica*, 18(1), 11–19.
- Cisneros, E. y Barrientos, Y. (2008). Fluctuaciones anuales de la temperatura, salinidad, pH y alcalinidad total en aguas superficiales de Isla Larga, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de Investigación*, 63, 153–172.
- Clarkson, M. O., Kasemann, S. A., Wood, R. A., Lenton, T. M., Daines, S. J., Richo, S., ... Tipper, E. T. (2015). The Ocean Acidification and the Permo-Triassic Mass Extinction. *Science*, 348(6231), 229–233.
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E. y Terpenning, I. (1990). STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3–73.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368), 829–836.
- Collins, W. D., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Sun, Y., Portmann, R. W., Fu, Q., ... Zhong, W. Y. (2006). Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases : Estimates from climate models in the Intergovernmental Panel on Climate Change ( IPCC ) Fourth Assessment Report ( AR4 ). *Journal of Geophysical Research*, 111, 1–15.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M. y Ocampo-Torres, F. J. (2007). On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26(1), 149–163.
- Cuevas Renaud, C. M. (1996). *Generalidades del Análisis Factorial*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 99 p.

- Demico, R. V, Lowenstein, T. K. y Hardie, L. A. (2003). Atmospheric pCO<sub>2</sub> since 60 Ma from records of seawater pH, calcium, and primary carbonate mineralogy. *Geological Society of America*, 31(9), 793–796.
- Dickson, A. G. (2010). The carbon dioxide system in sea water: equilibrium chemistry and measurements. *Guide for Best Practices in Ocean Acidification Research and Data Reporting*, 1, 17–40.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A. y Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 213–251.
- Dowsett, H. J. y Robinson, M. M. (2008). Mid-Pliocene equatorial Pacific sea surface temperature reconstruction: a multi-proxy perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1886), 109–125.
- Elizondo, C. (2012). *Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Área de Protección de Flora y Fauna Humedales de Puerto Morelos, Quintana Roo, México*. Quintana Roo: SEMARNAT, 108 p.
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A. y Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65, 414–432.
- Fahey, D. W., Doherty, S. J., Hibbard, K. A., Romanou, A. y Taylor, P. C. (2017). Physical Drivers of Climate Change. En D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart y T. K. Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (pp. 73–113). Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program.
- Feely, R. A., Wanninkhof, R., Mcgillis, W., Carr, M. y Cosca, C. E. (2004). Effects of wind speed and gas exchange parameterizations on the air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 109, 1–10.
- Feely, Richard A., Alin, S. R., Newton, J., Sabine, C. L., Warner, M., Devol, A., ... Maloy, C. (2010). The combined effects of ocean acidification, mixing, and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(4), 442–449.
- Feely, Richard A., Doney, S. C. y Cooley, S. R. (2009). Ocean Acidification: Present Conditions and Future Changes in a High-CO<sub>2</sub> World. *Oceanography*, 22(4), 36–47.
- Feely, Richard A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Ianson, D. y Hales, B. (2008). Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 320(5882), 1490–1492.
- Foster, G. L. (2008). Seawater pH, pCO<sub>2</sub> and [CO<sub>2</sub><sup>-3</sup>] variations in the Caribbean Sea over the last 130 kyr: A boron isotope and B/Ca study of planktic foraminifera. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1–4), 254–266.
- Foster, G. L. y Rae, J. W. B. (2016). Reconstructing Ocean pH with Boron Isotopes in Foraminifera. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 207–237.
- Franks, J., Johnson, D., Ko, D. S., Sanchez-Rubio, G., Hendon, R. y Lay, M. (2011). Unprecedented Influx of Pelagic *Sargassum* Along Caribbean Island Coastlines During 2011. *Gulf and Caribbean Fisheries*, 64, 6–8.

- Frieder, C. A., Nam, S. H., Martz, T. R. y Levin, L. A. (2012). High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Biogeosciences*, 9, 3917–3930.
- Friedman, J. H. (1984). *A Variable Span Smoother. Laboratory for Computational Statistics*. California: Stanford University, 30 p.
- Gattuso, J. P., Epitalon, J.-M., Lavigne, H. y Orr, J. (2019). Seacarb: Seawater Carbonate Chemistry. R package, 146 p.
- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S. y Buddemeier, R. W. (1998). Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 18(1–2), 37–46.
- Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., Millero, F. K. y Eakin, M. (2008). Ocean acidification of the Greater Caribbean Region 1996-2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(10), 1–11.
- Gledhill, D. K., White, M. M., Salisbury, J., Thomas, H., Misna, I., Liebman, M., ... Wang, Z. A. (2015). Ocean and coastal acidification off New England and Nova Scotia. *Oceanography*, 28(2), 182–197.
- González, A., Torruco, D. y Torruco, Á. D. (2017). Las playas arenosas de Quintana Roo, México: La diversidad de su fauna intermareal. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(2), 361–373.
- González González, G. (2018). *Determinación de la posible relación entre diferentes fenómenos del Clima Espacial y la enfermedad de Epilepsia en seres humanos mediante análisis Wavelet*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 111 p.
- Gouhier, T. C., Grinsted, A. y Simko, V. (2018). R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses (Version 0.20.17).
- Gray, S. E. C., DeGrandpre, M. D., Langdon, C. y Corredor, J. E. (2012). Short-term and seasonal pH, pCO<sub>2</sub> and saturation state variability in a coral-reef ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, 1–13.
- Grinsted, A., Moore, J. C. y Jevrejeva, S. (2004). Nonlinear Processes in Geophysics Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566.
- Grolemund, G. y Wickham, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), 1–25.
- Gross, J. y Ligges, U. (2015). R Package “nortest”: Tests for Normality.
- Halevy, I. y Bachan, A. (2017). The geologic history of seawater pH. *Science*, 355(6329), 1069–1071.
- Henson, S. A., Beaulieu, C. y Lampitt, R. (2016). Observing climate change trends in ocean biogeochemistry: when and where. *Global Change Biology*, 22, 1561–1571.

- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A. y Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 218(1–4), 517–528.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., ... Hatzioios, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5857), 1737–1742.
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D. N., Thomas, E., Gibbs, S. J., Sluijs, A., ... Ziveri, P. (2012). The Geological Record of Ocean Acidification. *Science*, 335(6072), 1058–1063.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. (2018). Goal 14. *Sustainable Development Knowledge Platform*, 1–6 p.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. (R. K. Pachauri y L. A. Meyer, Eds.) (1a ed.). Ginebra, Suiza: IPCC, 157 p.
- Jewett, L. y Romanou, A. (2017). Ocean Acidification and Other Ocean Changes. En D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart y T. K. Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (Vol. I, pp. 364–392). Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program.
- Jordan, E., Merino, M., Moreno, O. y Martin, E. (1981). Community structure of coral reefs in the Mexican Caribbean. *Proc 4th Int Coral Reef Symp*, 2, 303–308.
- Kapsenberg, L. y Hofmann, G. E. (2016). Ocean pH time-series and drivers of variability along the northern Channel Islands, California, USA. *Limnology and Oceanography*, 61, 953–968.
- Kerrison, P., Hall-Spencer, J., Suggett, D. J., Hepburn, L. y Steinke, M. (2011). Assessment of pH variability at a coastal CO<sub>2</sub> vent for ocean acidification studies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1–9.
- Kleypas, J. A. y Langdon, C. (2006). Coral Reefs and Changing Seawater Carbonate Chemistry. *Coastal and Estuarine Studies: Coral Reefs and Climate Change Science and Management*, (61), 73–110.
- Kleypas, J. A., McManus, J. W. y Meñez, L. A. B. (1999). Environmental Limits to Coral Reef Development: Where Do We Draw the Line? *American Zoologist*, 1, 146–159.
- Lalli, C. M. y Parsons, T. R. (2013). *Biological Oceanography an Introduction* (2nd ed., Vol. 53). China: Elsevier, 337 p.
- Leclercq, N., Gattuso, J. y Jaubert, J. (2002). Primary production, respiration and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO<sub>2</sub> partial pressure. *Limnology and Oceanography*, 47(2), 558–564.
- Libes, S. (2009). *Introduction to Marine Biogeochemistry* (2nd ed.). United States of America: Academic Press, 893 p.

- Maul, G. A. (1996). *Small Islands: Marine Science and Sustainable Development*. (M. J. Bowman y C. N. K. Mooers, Eds.), *Coastal and Estuarine Studies* (Vol. 51). Estados Unidos de América: American Geophysical Union, 467 p.
- Merino Ibarra, M. (1992). *Afloramiento en la plataforma de Yucatán: Estructura y Fertilización*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, 236 p.
- Merino Ibarra, M. y Otero Dávalos, L. (1983). *Atlas Ambiental Costero Puerto Morelos, Quintana Roo*. Chetumal: Centro de Investigaciones de Quintana Roo. Chetumal: Centro de Investigaciones de Quintana Roo, 69 p.
- Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography* (4a ed.). New York: CRC Press, 571 p.
- Null, K. A., Knee, K. L., Crook, E. D., de Sieyes, N. R., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández-Terrones, L. y Paytan, A. (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research*, 77, 38–50.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., ... Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), 681–686.
- Ortiz, M., Winfield, I. y Cházaro-Olvera, S. (2017). Primeros Registros de Mísidos (Crustacea: Peracarida, Myseda) del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Novitates Caribaea*, (11), 46–50.
- Palmer, M. R., Pearson, P. N. y Cobb, S. J. (1998). Reconstructing Past Ocean pH-Depth Profiles. *Science*, 282(5393), 1468–1471.
- Park, K. (1966). Deep-Sea pH. *Science*, 154(3756), 1540–1542.
- Pelejero, C., Calvo, E. y Hoegh-Guldberg, O. (2010). Paleo-perspectives on ocean acidification. *Trends in Ecology y Evolution*, 25(6), 332–344.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G. y Socki, R. A. (2003). Hydrogeology of the Yucatán Peninsula. En *The Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface*. (pp. 115–138). New York: Food Products Press.
- Piñón Gimete, A. (1998). *Estudio de las Comunidades Algales del Sistema Arrecifal de Puerto Morelos*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 67 p.
- Price, N. N., Martz, T. R., Brainard, R. E. y Smith, J. E. (2012). Diel Variability in Seawater pH Relates to Calcification and Benthic Community Structure on Coral Reefs. *PLoS ONE*, 7(8), 1–9.
- Raffo Lecca, E. y Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 17(1), 71–80.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., ... Watson, A. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. *The Royal Society*.

- Razali, N. M. y Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- RCoreTeam. (2018). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <https://www.r-project.org/>.
- Restrepo, L. F. y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 183–192.
- Rhein, M., Rintoul, S. R., Campos, E., Chambers, D., Feely, F. A., Gulev, S., ... Wang, F. (2013). Observations: Ocean. En T. F. Stocker, D. Qin, P. G.K., M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (pp. 255–316). Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA: Cambridge University Press.
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P., Zeebe, R. E. y Morel, F. M. M. (2000). Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 407, 364–367.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Ruíz-Rentería, F., van Tussenbroek, B., Barba-Santos, G., Escalante-Mancera, E., Jordán-Garza, G. y Jordán-Dahlgren, E. (2010). Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 58, 23–43.
- Romeu, E. (1995). El arrecife como recurso. *Biodiversitas*, 3, 8–13.
- SAS Institute. (1999). The LOESS Procedure. *SAS OnlineDOC* (8a ed.). United States of America: SAS Institute Inc. Recuperado el 20 de marzo de 2019 de <http://www.math.wpi.edu/saspdf/stat/chap38.pdf>
- Schmitter-Soto, J. J., Vásquez-Yeomans, L., Aguilar-Perera, A., Curiel-Mondragón, C. y Caballero-Vásquez, J. A. (2000). Lista de peces marinos del Caribe Mexicano. *Anales del Instituto de Biología. Serie Zoología*, 71(2), 143–177.
- Secaira Fajardo, F., Reguero, B. R. y Acevedo Ramírez, C. A. (2017). *Importancia de los arrecifes de coral y las dunas en la protección costera. Serie técnica: El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el Caribe mexicano*. Mérida, México, 31 p.
- Sosdian, S. M., Greenop, R., Hain, M. P., Foster, G. L., Pearson, P. N. y Lear, C. H. (2018). Constraining the evolution of Neogene ocean carbonate chemistry using the boron isotope pH proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 498, 362–376.
- Suárez-Morales, E. y Rivera Arriaga, E. (1998). Zooplankton e hidrodinámica en zonas litorales y arrecifales de Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 8, 19–32.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Chipman, D. W., Goddard, J. G., Ho, C., Newberger, T., ... Munro, D. R. (2014). Climatological distributions of pH, pCO<sub>2</sub>, total CO<sub>2</sub>, alkalinity, and CaCO<sub>3</sub> saturation in the global surface ocean and temporal changes at selected locations. *Marine Chemistry*, 164, 95–125.

- Tarback, E. J., Lutgens, F. K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8a ed.). Madrid: Pearson Education, 736 p.
- Torrence, C. y Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78.
- Tussenbroek, B. I. Van, Hernández, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., ... Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122, 272–281.
- United Nations. (2015). Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. *United Nations Development Programme*, 41.
- Wallace, R. B., Baumann, H., Grear, J. S., Aller, R. C. y Gobler, C. J. (2014). Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 148, 1–13.
- Wanninkhof, R., Olsen, A. y Triñanes, J. (2007). Air–sea CO<sub>2</sub> fluxes in the Caribbean Sea from 2002–2004. *Journal of Marine Systems*, 66, 272–284.
- Wood, H. L., Spicer, J. I. y Widdicombe, S. (2008). Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1644), 1767–1773.
- Wootton, J. T., Pfister, C. A. y Forester, J. D. (2008). Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *PNAS*, 105(48), 18848–18853.
- Wuebbles, D. J., Easterling, D. R., Hayhoe, K., Knutson, T., Kopp, R. E., Kossin, J. P., ... Wehner, M. F. (2017). Our Globally Changing Climate. En D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart y T. K. Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (pp. 35–72). Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program.
- Zamora, M. E., Huerta, A. H. y Maqueo, O. P. (2015). Cambio global : el Antropoceno. *CIENCIA ergo-sum*, 23(1), 67–75.
- Zamora Muñoz, S., Monroy Cazorla, L. y Chávez Álvarez, C. (2010). *Análisis Factorial: una técnica para evaluar la dimensionalidad de las pruebas* (1a ed.). México: CENEVAL, 104 p.
- Zeebe, R. E. (2012). History of Seawater Carbonate Chemistry, Atmospheric CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1), 141–165.

## 8. Anexo

### 8.1. Matriz de datos utilizada en el Análisis de Factores.

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
05/09/2016 00:00	29.95	33599.90	8.01	676.45	2.73E-03	3.64E-04	3.11E-03	8.52	3.56E-03
05/09/2016 00:30	29.92	33543.50	8.01	663.59	2.66E-03	3.53E-04	3.03E-03	8.35	3.47E-03
05/09/2016 01:00	29.88	33560.80	8.01	661.15	2.64E-03	3.47E-04	3.00E-03	8.26	3.44E-03
05/09/2016 01:30	29.84	33599.90	8.01	672.32	2.67E-03	3.50E-04	3.04E-03	8.16	3.48E-03
05/09/2016 02:30	29.77	33560.80	8.01	679.71	2.70E-03	3.51E-04	3.06E-03	7.84	3.50E-03
05/09/2016 03:00	29.67	33521.80	8.00	695.77	2.74E-03	3.53E-04	3.11E-03	7.68	3.55E-03
05/09/2016 03:30	29.67	33539.20	8.00	680.53	2.67E-03	3.43E-04	3.03E-03	7.70	3.46E-03
05/09/2016 04:00	29.66	33521.80	8.00	685.40	2.67E-03	3.41E-04	3.03E-03	7.62	3.46E-03
05/09/2016 04:30	29.62	33500.20	8.00	690.79	2.69E-03	3.42E-04	3.05E-03	7.54	3.48E-03
05/09/2016 05:00	29.64	33530.50	7.99	680.19	2.63E-03	3.32E-04	2.98E-03	7.54	3.39E-03
05/09/2016 05:30	29.58	33500.20	7.99	691.05	2.67E-03	3.36E-04	3.02E-03	7.34	3.44E-03
05/09/2016 06:00	29.55	33521.80	7.99	712.07	2.73E-03	3.40E-04	3.09E-03	7.09	3.51E-03
05/09/2016 06:30	29.49	33500.20	7.99	708.07	2.71E-03	3.35E-04	3.06E-03	6.93	3.47E-03
05/09/2016 07:00	29.43	33470.00	7.99	715.47	2.71E-03	3.33E-04	3.07E-03	6.75	3.48E-03
05/09/2016 07:30	29.40	33491.60	7.98	734.37	2.76E-03	3.35E-04	3.11E-03	6.55	3.52E-03
05/09/2016 08:00	29.39	33461.40	7.98	745.16	2.78E-03	3.36E-04	3.14E-03	6.60	3.55E-03
05/09/2016 08:30	29.41	33491.60	7.97	716.82	2.65E-03	3.18E-04	2.99E-03	6.85	3.38E-03
05/09/2016 09:00	29.41	33461.40	7.97	739.72	2.71E-03	3.22E-04	3.05E-03	6.77	3.45E-03
05/09/2016 09:30	29.40	33478.70	7.97	726.80	2.65E-03	3.12E-04	2.98E-03	6.73	3.37E-03
05/09/2016 10:00	29.37	33470.00	7.97	727.96	2.64E-03	3.09E-04	2.97E-03	6.67	3.35E-03
05/09/2016 10:30	29.36	33483.00	7.96	738.14	2.67E-03	3.13E-04	3.01E-03	6.59	3.39E-03
05/09/2016 11:00	29.37	33478.70	7.96	734.39	2.64E-03	3.06E-04	2.97E-03	6.57	3.35E-03
05/09/2016 11:30	29.36	33483.00	7.96	735.19	2.62E-03	3.02E-04	2.94E-03	6.61	3.32E-03
05/09/2016 12:00	29.35	33461.40	7.96	712.48	2.54E-03	2.91E-04	2.85E-03	6.74	3.21E-03
05/09/2016 12:30	29.37	33491.60	7.95	701.50	2.48E-03	2.82E-04	2.78E-03	6.79	3.13E-03
05/09/2016 13:00	29.37	33500.20	7.96	717.77	2.55E-03	2.93E-04	2.86E-03	6.84	3.23E-03
05/09/2016 13:30	29.40	33552.10	7.96	722.85	2.57E-03	2.95E-04	2.88E-03	6.97	3.25E-03
05/09/2016 14:00	29.42	33491.60	7.96	721.88	2.58E-03	2.98E-04	2.89E-03	7.03	3.27E-03
05/09/2016 14:30	29.48	33552.10	7.96	678.51	2.43E-03	2.83E-04	2.74E-03	7.36	3.10E-03
05/09/2016 15:00	29.54	33569.50	7.96	691.27	2.48E-03	2.88E-04	2.78E-03	7.65	3.15E-03
05/09/2016 15:30	29.60	33560.80	7.96	685.39	2.46E-03	2.87E-04	2.76E-03	7.79	3.12E-03
05/09/2016 16:00	29.66	33595.50	7.97	669.15	2.42E-03	2.86E-04	2.72E-03	7.88	3.09E-03
05/09/2016 16:30	29.72	33595.50	7.97	669.48	2.42E-03	2.87E-04	2.73E-03	8.00	3.09E-03
05/09/2016 17:00	29.80	33634.70	7.97	657.27	2.39E-03	2.86E-04	2.69E-03	8.14	3.06E-03
05/09/2016 17:30	29.86	33674.00	7.97	688.52	2.52E-03	3.04E-04	2.84E-03	8.20	3.23E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
05/09/2016 18:00	29.91	33665.20	7.97	676.01	2.48E-03	3.00E-04	2.79E-03	8.12	3.17E-03
05/09/2016 18:30	29.97	33665.20	7.97	668.78	2.46E-03	2.98E-04	2.77E-03	8.21	3.15E-03
05/09/2016 19:00	30.08	33695.80	7.97	691.95	2.54E-03	3.10E-04	2.87E-03	8.35	3.26E-03
05/09/2016 19:30	30.18	33687.10	7.97	682.20	2.50E-03	3.05E-04	2.82E-03	8.55	3.21E-03
05/09/2016 20:00	30.25	33717.70	7.97	654.00	2.40E-03	2.95E-04	2.71E-03	8.67	3.09E-03
05/09/2016 20:30	30.28	33730.80	7.97	662.30	2.41E-03	2.95E-04	2.73E-03	8.93	3.10E-03
05/09/2016 21:00	30.31	33730.80	7.97	644.81	2.36E-03	2.90E-04	2.67E-03	9.05	3.04E-03
05/09/2016 21:30	30.33	33779.10	7.98	655.43	2.42E-03	3.01E-04	2.74E-03	9.07	3.12E-03
05/09/2016 22:00	30.35	33779.10	7.98	660.92	2.44E-03	3.03E-04	2.76E-03	8.92	3.14E-03
05/09/2016 22:30	30.36	33792.30	7.98	650.86	2.40E-03	2.99E-04	2.72E-03	8.87	3.10E-03
05/09/2016 23:00	30.35	33779.10	7.97	659.45	2.42E-03	2.98E-04	2.73E-03	8.69	3.11E-03
05/09/2016 23:30	30.36	33770.30	7.97	692.86	2.54E-03	3.12E-04	2.86E-03	8.66	3.26E-03
06/09/2016 00:00	30.37	33761.60	7.97	688.79	2.51E-03	3.08E-04	2.84E-03	8.98	3.23E-03
06/09/2016 00:30	30.40	33792.30	7.97	691.83	2.53E-03	3.12E-04	2.86E-03	9.10	3.25E-03
06/09/2016 01:30	30.31	33730.80	7.98	688.93	2.55E-03	3.16E-04	2.88E-03	8.60	3.28E-03
06/09/2016 02:00	30.27	33739.60	7.98	716.22	2.66E-03	3.30E-04	3.00E-03	8.60	3.42E-03
06/09/2016 02:30	30.27	33787.90	7.98	691.55	2.58E-03	3.22E-04	2.92E-03	8.51	3.32E-03
06/09/2016 03:00	30.25	33739.60	7.98	706.24	2.65E-03	3.33E-04	3.00E-03	8.47	3.41E-03
06/09/2016 03:30	30.22	33770.30	7.98	695.96	2.62E-03	3.29E-04	2.96E-03	8.46	3.37E-03
06/09/2016 04:00	30.20	33739.60	7.98	705.34	2.64E-03	3.31E-04	2.99E-03	8.43	3.40E-03
06/09/2016 04:30	30.17	33770.30	7.98	690.83	2.60E-03	3.26E-04	2.94E-03	8.37	3.35E-03
06/09/2016 05:00	30.21	33761.60	7.98	694.96	2.61E-03	3.28E-04	2.96E-03	8.43	3.37E-03
06/09/2016 05:30	30.24	33787.90	7.99	675.21	2.55E-03	3.23E-04	2.89E-03	8.45	3.30E-03
06/09/2016 06:00	30.26	33779.10	7.99	680.36	2.58E-03	3.27E-04	2.92E-03	8.41	3.33E-03
06/09/2016 06:30	30.24	33761.60	7.98	684.48	2.56E-03	3.21E-04	2.90E-03	8.30	3.30E-03
06/09/2016 07:00	30.21	33801.10	7.99	707.29	2.70E-03	3.45E-04	3.06E-03	8.32	3.49E-03
06/09/2016 07:30	30.19	33748.40	7.99	701.08	2.70E-03	3.47E-04	3.06E-03	8.29	3.49E-03
06/09/2016 08:00	30.18	33748.40	7.99	719.81	2.78E-03	3.58E-04	3.15E-03	8.23	3.59E-03
06/09/2016 08:30	30.17	33748.40	7.99	708.50	2.74E-03	3.53E-04	3.11E-03	8.06	3.55E-03
06/09/2016 09:00	30.17	33748.40	7.99	710.90	2.73E-03	3.51E-04	3.10E-03	7.93	3.54E-03
06/09/2016 09:30	30.12	33779.10	7.99	698.09	2.70E-03	3.47E-04	3.06E-03	8.13	3.49E-03
06/09/2016 10:00	30.13	33787.90	7.99	708.39	2.72E-03	3.48E-04	3.09E-03	8.09	3.52E-03
06/09/2016 10:30	30.13	33748.40	8.00	696.08	2.70E-03	3.48E-04	3.06E-03	8.14	3.49E-03
06/09/2016 11:00	30.13	33748.40	8.00	695.33	2.70E-03	3.50E-04	3.07E-03	8.10	3.50E-03
06/09/2016 11:30	30.13	33787.90	8.00	700.90	2.75E-03	3.58E-04	3.12E-03	8.01	3.57E-03
06/09/2016 12:00	30.12	33757.20	8.00	690.91	2.71E-03	3.53E-04	3.08E-03	7.86	3.52E-03
06/09/2016 12:30	30.09	33708.90	8.00	709.93	2.78E-03	3.63E-04	3.17E-03	7.78	3.61E-03
06/09/2016 13:00	30.06	33726.50	8.00	736.10	2.88E-03	3.75E-04	3.28E-03	7.85	3.74E-03
06/09/2016 13:30	30.07	33748.40	8.00	720.59	2.81E-03	3.65E-04	3.20E-03	7.88	3.65E-03
06/09/2016 14:00	30.10	33765.90	8.00	710.01	2.78E-03	3.63E-04	3.16E-03	8.05	3.61E-03
06/09/2016 14:30	30.15	33757.20	8.00	700.17	2.75E-03	3.59E-04	3.12E-03	8.21	3.57E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
06/09/2016 15:30	30.22	33779.10	8.00	702.09	2.75E-03	3.61E-04	3.13E-03	8.62	3.58E-03
06/09/2016 16:30	30.13	33770.30	8.01	697.05	2.77E-03	3.68E-04	3.16E-03	8.98	3.61E-03
06/09/2016 17:30	30.15	33757.20	8.01	681.09	2.72E-03	3.62E-04	3.10E-03	9.85	3.55E-03
06/09/2016 18:00	30.20	33787.90	8.01	677.65	2.71E-03	3.62E-04	3.09E-03	9.96	3.54E-03
06/09/2016 19:00	30.29	33801.10	8.02	647.60	2.64E-03	3.60E-04	3.01E-03	10.39	3.46E-03
07/09/2016 01:30	30.71	33876.20	8.02	711.40	2.94E-03	4.14E-04	3.37E-03	8.66	3.87E-03
07/09/2016 02:00	30.71	33871.80	8.02	712.06	2.91E-03	4.06E-04	3.33E-03	8.64	3.83E-03
07/09/2016 02:30	30.67	33862.90	8.02	744.53	3.01E-03	4.15E-04	3.45E-03	8.14	3.95E-03
07/09/2016 03:00	30.63	33801.10	8.01	724.89	2.88E-03	3.91E-04	3.29E-03	8.11	3.77E-03
07/09/2016 03:30	30.59	33823.20	8.01	724.89	2.88E-03	3.88E-04	3.29E-03	8.33	3.76E-03
07/09/2016 04:00	30.58	33823.20	8.01	682.40	2.70E-03	3.62E-04	3.07E-03	8.30	3.52E-03
07/09/2016 04:30	30.56	33832.00	8.00	684.70	2.69E-03	3.59E-04	3.07E-03	8.20	3.51E-03
07/09/2016 05:00	30.53	33832.00	8.00	675.91	2.66E-03	3.56E-04	3.04E-03	8.20	3.48E-03
07/09/2016 05:30	30.52	33823.20	8.00	693.52	2.71E-03	3.59E-04	3.09E-03	8.07	3.53E-03
07/09/2016 06:00	30.47	33770.30	8.00	681.62	2.68E-03	3.57E-04	3.06E-03	8.03	3.50E-03
07/09/2016 06:30	30.45	33770.30	8.00	666.30	2.61E-03	3.46E-04	2.98E-03	7.92	3.41E-03
07/09/2016 07:00	30.45	33761.60	8.00	695.41	2.72E-03	3.59E-04	3.10E-03	7.68	3.54E-03
07/09/2016 07:30	30.44	33792.30	8.00	690.74	2.68E-03	3.50E-04	3.04E-03	7.49	3.48E-03
07/09/2016 08:00	30.42	33801.10	8.00	703.70	2.72E-03	3.55E-04	3.10E-03	7.43	3.54E-03
07/09/2016 08:30	30.40	33739.60	7.99	678.28	2.60E-03	3.36E-04	2.95E-03	7.56	3.37E-03
07/09/2016 09:00	30.36	33761.60	7.99	691.28	2.64E-03	3.40E-04	3.00E-03	7.48	3.42E-03
07/09/2016 09:30	30.33	33770.30	7.99	686.68	2.63E-03	3.40E-04	2.99E-03	7.45	3.42E-03
07/09/2016 10:00	30.31	33748.40	7.99	676.97	2.59E-03	3.32E-04	2.94E-03	7.47	3.36E-03
07/09/2016 10:30	30.30	33779.10	7.99	687.06	2.63E-03	3.38E-04	2.98E-03	7.42	3.41E-03
07/09/2016 11:00	30.32	33779.10	7.99	718.01	2.73E-03	3.50E-04	3.10E-03	7.15	3.54E-03
07/09/2016 11:30	30.33	33779.10	7.98	741.83	2.80E-03	3.54E-04	3.17E-03	6.97	3.60E-03
07/09/2016 12:00	30.34	33761.60	7.98	730.52	2.73E-03	3.44E-04	3.10E-03	6.84	3.52E-03
07/09/2016 12:30	30.34	33752.80	7.98	719.37	2.68E-03	3.36E-04	3.03E-03	6.72	3.45E-03
07/09/2016 13:00	30.35	33752.80	7.98	730.21	2.71E-03	3.37E-04	3.06E-03	6.93	3.48E-03
07/09/2016 15:00	30.25	33770.30	7.96	728.32	2.61E-03	3.13E-04	2.94E-03	6.28	3.33E-03
07/09/2016 16:00	30.33	33823.20	7.96	724.14	2.61E-03	3.15E-04	2.94E-03	6.86	3.34E-03
07/09/2016 16:30	30.42	33862.90	7.97	692.21	2.50E-03	3.04E-04	2.82E-03	7.54	3.21E-03
07/09/2016 17:00	30.46	33885.00	7.97	692.82	2.51E-03	3.08E-04	2.84E-03	6.99	3.23E-03
07/09/2016 17:30	30.41	33876.20	7.97	702.02	2.57E-03	3.17E-04	2.91E-03	7.46	3.30E-03
07/09/2016 18:00	30.39	33845.20	7.98	673.03	2.48E-03	3.09E-04	2.81E-03	7.76	3.20E-03
07/09/2016 18:30	30.43	33876.20	7.98	661.77	2.47E-03	3.10E-04	2.79E-03	8.12	3.18E-03
07/09/2016 19:00	30.50	33902.80	7.98	633.92	2.37E-03	3.00E-04	2.69E-03	8.34	3.07E-03
07/09/2016 19:30	30.57	33876.20	7.99	650.59	2.46E-03	3.15E-04	2.79E-03	8.36	3.19E-03
07/09/2016 20:30	30.77	33938.30	7.99	630.39	2.38E-03	3.07E-04	2.70E-03	8.63	3.10E-03
08/09/2016 00:30	31.08	34063.20	7.99	698.56	2.63E-03	3.44E-04	2.99E-03	8.16	3.42E-03
08/09/2016 01:00	31.03	34031.90	7.98	678.92	2.55E-03	3.31E-04	2.90E-03	8.08	3.32E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
08/09/2016 01:30	31.01	34031.90	7.99	657.16	2.48E-03	3.23E-04	2.82E-03	8.46	3.23E-03
08/09/2016 02:00	31.02	34014.00	7.98	676.91	2.54E-03	3.30E-04	2.89E-03	8.25	3.30E-03
08/09/2016 02:30	31.01	34000.60	7.98	684.26	2.57E-03	3.33E-04	2.92E-03	8.03	3.34E-03
08/09/2016 03:00	30.96	34040.80	7.98	674.05	2.53E-03	3.27E-04	2.87E-03	7.93	3.29E-03
08/09/2016 03:30	30.87	34022.90	7.98	681.62	2.55E-03	3.28E-04	2.89E-03	7.79	3.31E-03
08/09/2016 04:00	30.77	33960.50	7.98	702.84	2.64E-03	3.38E-04	2.99E-03	7.67	3.41E-03
08/09/2016 04:30	30.73	33969.40	7.99	685.89	2.59E-03	3.33E-04	2.94E-03	7.75	3.35E-03
08/09/2016 05:00	30.71	33969.40	7.99	686.83	2.60E-03	3.35E-04	2.95E-03	7.58	3.37E-03
08/09/2016 05:30	30.68	33978.30	7.98	678.72	2.55E-03	3.27E-04	2.89E-03	7.61	3.30E-03
08/09/2016 06:00	30.66	33956.00	7.98	698.73	2.63E-03	3.38E-04	2.99E-03	7.59	3.41E-03
08/09/2016 06:30	30.62	33956.00	7.98	693.71	2.60E-03	3.31E-04	2.95E-03	7.59	3.36E-03
08/09/2016 07:00	30.62	33956.00	7.99	686.51	2.59E-03	3.32E-04	2.94E-03	7.67	3.36E-03
08/09/2016 07:30	30.60	33956.00	7.99	667.84	2.53E-03	3.25E-04	2.87E-03	7.87	3.28E-03
08/09/2016 08:00	30.58	33947.20	7.99	651.21	2.47E-03	3.18E-04	2.80E-03	7.79	3.21E-03
08/09/2016 08:30	30.55	33978.30	7.99	670.88	2.57E-03	3.35E-04	2.93E-03	7.79	3.35E-03
08/09/2016 09:00	30.51	33938.30	7.99	648.02	2.50E-03	3.26E-04	2.84E-03	7.70	3.25E-03
08/09/2016 09:30	30.49	33947.20	7.99	719.63	2.77E-03	3.61E-04	3.15E-03	7.62	3.60E-03
08/09/2016 10:00	30.44	33916.10	7.99	713.50	2.75E-03	3.56E-04	3.12E-03	7.33	3.56E-03
08/09/2016 10:30	30.38	33871.80	7.99	721.99	2.77E-03	3.57E-04	3.14E-03	7.06	3.58E-03
08/09/2016 11:00	30.36	33885.00	7.99	748.25	2.84E-03	3.63E-04	3.22E-03	6.54	3.67E-03
08/09/2016 11:30	30.30	33902.80	7.99	766.37	2.90E-03	3.67E-04	3.28E-03	6.29	3.73E-03
08/09/2016 12:00	30.24	33924.90	7.98	777.41	2.91E-03	3.65E-04	3.30E-03	6.18	3.74E-03
08/09/2016 12:30	30.23	33885.00	7.98	782.44	2.92E-03	3.64E-04	3.30E-03	6.15	3.74E-03
08/09/2016 13:00	30.25	33885.00	7.97	778.37	2.87E-03	3.54E-04	3.24E-03	6.18	3.67E-03
08/09/2016 13:30	30.28	33885.00	7.97	782.24	2.86E-03	3.51E-04	3.24E-03	6.32	3.66E-03
08/09/2016 14:00	30.33	33876.20	7.97	767.35	2.79E-03	3.41E-04	3.15E-03	6.53	3.57E-03
08/09/2016 14:30	30.38	33893.90	7.97	733.54	2.67E-03	3.26E-04	3.01E-03	6.93	3.42E-03
08/09/2016 15:00	30.42	33893.90	7.97	709.69	2.59E-03	3.19E-04	2.93E-03	7.47	3.33E-03
08/09/2016 15:30	30.48	33876.20	7.97	701.87	2.56E-03	3.16E-04	2.89E-03	7.66	3.29E-03
08/09/2016 16:30	30.63	33938.30	7.98	706.61	2.63E-03	3.33E-04	2.98E-03	8.13	3.39E-03
08/09/2016 17:00	30.68	33987.20	7.98	677.34	2.54E-03	3.25E-04	2.88E-03	8.43	3.29E-03
08/09/2016 17:30	30.75	33929.40	7.99	681.04	2.57E-03	3.31E-04	2.91E-03	8.54	3.33E-03
08/09/2016 18:00	30.79	33978.30	7.99	636.62	2.43E-03	3.17E-04	2.76E-03	9.09	3.17E-03
08/09/2016 19:00	30.81	34054.20	8.00	682.88	2.63E-03	3.47E-04	3.00E-03	9.47	3.43E-03
08/09/2016 19:30	30.85	34040.80	8.00	661.16	2.56E-03	3.41E-04	2.92E-03	9.72	3.35E-03
08/09/2016 20:00	30.90	34085.60	8.00	668.46	2.59E-03	3.46E-04	2.96E-03	9.85	3.39E-03
08/09/2016 20:30	30.95	34094.60	8.00	649.06	2.53E-03	3.41E-04	2.89E-03	10.14	3.32E-03
08/09/2016 21:00	30.99	34094.60	8.00	635.59	2.48E-03	3.34E-04	2.83E-03	10.10	3.25E-03
08/09/2016 21:30	31.04	34117.00	8.00	630.14	2.45E-03	3.30E-04	2.80E-03	9.90	3.22E-03
08/09/2016 22:00	31.03	34126.00	8.00	649.35	2.54E-03	3.44E-04	2.90E-03	9.69	3.33E-03
08/09/2016 22:30	31.04	34144.00	8.00	652.77	2.56E-03	3.48E-04	2.93E-03	9.74	3.36E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
08/09/2016 23:00	31.04	34144.00	8.01	642.50	2.55E-03	3.49E-04	2.91E-03	9.81	3.35E-03
08/09/2016 23:30	31.01	34144.00	8.01	648.67	2.59E-03	3.57E-04	2.96E-03	9.70	3.41E-03
09/09/2016 00:00	30.98	34144.00	8.01	629.79	2.52E-03	3.48E-04	2.88E-03	9.61	3.32E-03
09/09/2016 00:30	30.91	34135.00	8.01	635.68	2.56E-03	3.55E-04	2.93E-03	9.44	3.38E-03
09/09/2016 01:00	30.84	34103.50	8.02	656.02	2.66E-03	3.70E-04	3.05E-03	9.22	3.51E-03
09/09/2016 01:30	30.80	34090.10	8.02	646.19	2.62E-03	3.64E-04	3.00E-03	9.13	3.46E-03
09/09/2016 02:00	30.78	34063.20	8.02	652.92	2.66E-03	3.71E-04	3.05E-03	9.04	3.51E-03
09/09/2016 02:30	30.75	34103.50	8.02	648.22	2.64E-03	3.67E-04	3.02E-03	9.00	3.48E-03
09/09/2016 03:00	30.71	34058.70	8.02	642.50	2.63E-03	3.68E-04	3.02E-03	8.89	3.48E-03
09/09/2016 03:30	30.64	34018.40	8.02	667.93	2.73E-03	3.80E-04	3.13E-03	8.26	3.60E-03
09/09/2016 04:00	30.65	34072.10	8.02	650.23	2.66E-03	3.70E-04	3.04E-03	8.66	3.51E-03
09/09/2016 04:30	30.63	34090.10	8.02	653.20	2.64E-03	3.64E-04	3.02E-03	8.44	3.48E-03
09/09/2016 05:00	30.55	34067.70	8.02	675.97	2.76E-03	3.81E-04	3.15E-03	8.37	3.62E-03
09/09/2016 05:30	30.44	34027.40	8.02	656.48	2.68E-03	3.68E-04	3.06E-03	8.12	3.52E-03
09/09/2016 06:00	30.35	33964.90	8.02	673.76	2.75E-03	3.77E-04	3.14E-03	7.61	3.61E-03
09/09/2016 06:30	30.32	33942.70	8.01	672.99	2.72E-03	3.69E-04	3.11E-03	7.44	3.57E-03
09/09/2016 07:00	30.28	33956.00	8.01	688.61	2.75E-03	3.68E-04	3.14E-03	7.44	3.59E-03
09/09/2016 07:30	30.28	33951.60	8.01	692.76	2.77E-03	3.70E-04	3.15E-03	7.20	3.61E-03
09/09/2016 08:00	30.27	33982.80	8.01	693.95	2.75E-03	3.66E-04	3.14E-03	7.02	3.59E-03
09/09/2016 08:30	30.23	33942.70	8.00	688.19	2.72E-03	3.60E-04	3.10E-03	7.02	3.55E-03
09/09/2016 09:00	30.20	33964.90	8.00	717.16	2.83E-03	3.73E-04	3.22E-03	6.77	3.68E-03
09/09/2016 09:30	30.14	33920.50	8.00	711.54	2.80E-03	3.66E-04	3.18E-03	6.71	3.63E-03
09/09/2016 10:00	30.09	33911.60	8.00	698.47	2.70E-03	3.48E-04	3.07E-03	6.85	3.50E-03
09/09/2016 10:30	30.04	33889.50	7.99	734.17	2.84E-03	3.64E-04	3.22E-03	6.49	3.67E-03
09/09/2016 11:00	30.02	33889.50	7.99	777.32	2.95E-03	3.71E-04	3.34E-03	5.97	3.79E-03
09/09/2016 11:30	30.01	33889.50	7.98	784.08	2.95E-03	3.69E-04	3.34E-03	5.72	3.79E-03
09/09/2016 13:00	30.00	33911.60	7.97	770.02	2.82E-03	3.42E-04	3.18E-03	6.10	3.60E-03
09/09/2016 14:30	30.08	33902.80	7.96	778.97	2.81E-03	3.36E-04	3.16E-03	6.31	3.58E-03
09/09/2016 15:00	30.11	33916.10	7.96	762.34	2.73E-03	3.25E-04	3.07E-03	6.52	3.47E-03
09/09/2016 15:30	30.18	33942.70	7.96	735.47	2.61E-03	3.09E-04	2.94E-03	6.84	3.32E-03
09/09/2016 16:00	30.22	33933.80	7.96	722.14	2.56E-03	3.03E-04	2.88E-03	6.97	3.26E-03
09/09/2016 16:30	30.29	33956.00	7.96	695.34	2.46E-03	2.92E-04	2.77E-03	7.16	3.14E-03
09/09/2016 17:00	30.34	33964.90	7.96	708.95	2.50E-03	2.96E-04	2.81E-03	7.48	3.19E-03
09/09/2016 17:30	30.40	33978.30	7.96	696.50	2.47E-03	2.94E-04	2.78E-03	7.59	3.15E-03
09/09/2016 18:00	30.44	33978.30	7.96	690.10	2.46E-03	2.96E-04	2.77E-03	7.79	3.15E-03
09/09/2016 19:00	30.54	34009.50	7.96	665.75	2.37E-03	2.86E-04	2.67E-03	8.35	3.04E-03
09/09/2016 19:30	30.62	34072.10	7.96	658.21	2.35E-03	2.86E-04	2.66E-03	8.62	3.02E-03
09/09/2016 20:00	30.70	34072.10	7.96	656.57	2.35E-03	2.87E-04	2.65E-03	8.86	3.02E-03
09/09/2016 20:30	30.79	34103.50	7.96	636.84	2.28E-03	2.81E-04	2.58E-03	9.18	2.94E-03
09/09/2016 21:00	30.89	34094.60	7.97	649.74	2.35E-03	2.92E-04	2.66E-03	9.23	3.03E-03
09/09/2016 21:30	30.93	34135.00	7.97	638.06	2.31E-03	2.89E-04	2.62E-03	9.32	2.99E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
09/09/2016 22:00	30.98	34157.50	7.97	651.50	2.38E-03	3.01E-04	2.70E-03	9.26	3.09E-03
09/09/2016 22:30	31.02	34148.50	7.97	650.49	2.39E-03	3.03E-04	2.71E-03	9.23	3.09E-03
09/09/2016 23:00	31.05	34157.50	7.98	641.12	2.36E-03	3.02E-04	2.68E-03	9.25	3.07E-03
09/09/2016 23:30	31.07	34126.00	7.98	648.19	2.40E-03	3.07E-04	2.72E-03	9.34	3.11E-03
10/09/2016 00:00	31.08	34180.10	7.98	648.72	2.40E-03	3.07E-04	2.72E-03	9.43	3.11E-03
10/09/2016 00:30	31.08	34189.10	7.98	648.83	2.39E-03	3.04E-04	2.71E-03	9.56	3.10E-03
10/09/2016 01:00	31.08	34207.20	7.98	640.08	2.39E-03	3.10E-04	2.72E-03	9.68	3.11E-03
10/09/2016 01:30	31.06	34166.50	7.99	635.83	2.39E-03	3.12E-04	2.72E-03	9.75	3.12E-03
10/09/2016 02:00	31.02	34157.50	7.99	625.59	2.37E-03	3.09E-04	2.69E-03	9.69	3.09E-03
10/09/2016 02:30	30.95	34166.50	7.99	652.04	2.48E-03	3.25E-04	2.82E-03	9.44	3.23E-03
10/09/2016 04:00	30.94	34166.50	7.99	675.27	2.56E-03	3.35E-04	2.91E-03	9.04	3.33E-03
10/09/2016 04:30	30.94	34144.00	7.99	672.40	2.57E-03	3.38E-04	2.92E-03	9.07	3.35E-03
10/09/2016 05:00	30.93	34144.00	7.99	672.43	2.56E-03	3.35E-04	2.91E-03	8.51	3.33E-03
10/09/2016 05:30	30.88	34153.00	7.99	702.37	2.66E-03	3.47E-04	3.03E-03	8.29	3.46E-03
10/09/2016 06:00	30.85	34135.00	7.98	702.08	2.64E-03	3.41E-04	3.00E-03	8.08	3.43E-03
10/09/2016 06:30	30.81	34072.10	7.99	728.69	2.75E-03	3.55E-04	3.12E-03	7.87	3.56E-03
10/09/2016 07:00	30.79	34063.20	7.98	702.33	2.62E-03	3.35E-04	2.97E-03	8.07	3.39E-03
10/09/2016 07:30	30.78	34063.20	7.98	694.65	2.58E-03	3.27E-04	2.92E-03	8.17	3.33E-03
10/09/2016 08:00	30.76	34094.60	7.98	699.45	2.61E-03	3.33E-04	2.96E-03	8.01	3.38E-03
10/09/2016 08:30	30.73	34121.50	7.99	719.90	2.75E-03	3.60E-04	3.13E-03	8.00	3.58E-03
10/09/2016 09:00	30.69	34081.10	7.99	718.69	2.76E-03	3.62E-04	3.14E-03	8.06	3.59E-03
10/09/2016 09:30	30.68	34049.70	7.99	720.76	2.77E-03	3.63E-04	3.15E-03	7.99	3.60E-03
10/09/2016 10:00	30.65	34112.50	7.99	724.94	2.79E-03	3.64E-04	3.17E-03	7.97	3.62E-03
10/09/2016 10:30	30.64	34049.70	7.99	703.09	2.69E-03	3.51E-04	3.06E-03	8.09	3.50E-03
10/09/2016 11:00	30.67	34049.70	7.99	711.23	2.74E-03	3.60E-04	3.12E-03	7.87	3.56E-03
10/09/2016 11:30	30.69	34081.10	7.99	725.51	2.79E-03	3.67E-04	3.18E-03	7.76	3.63E-03
10/09/2016 12:00	30.69	34090.10	7.99	737.63	2.83E-03	3.70E-04	3.22E-03	7.41	3.67E-03
10/09/2016 12:30	30.70	34031.90	7.99	749.67	2.86E-03	3.72E-04	3.25E-03	7.37	3.71E-03
10/09/2016 13:30	30.74	34121.50	7.99	709.22	2.69E-03	3.48E-04	3.05E-03	7.85	3.49E-03
10/09/2016 14:00	30.78	34103.50	7.99	715.89	2.73E-03	3.55E-04	3.10E-03	8.08	3.54E-03
10/09/2016 14:30	30.81	34063.20	7.99	698.64	2.67E-03	3.49E-04	3.03E-03	8.46	3.47E-03
10/09/2016 15:00	30.85	34103.50	7.99	667.86	2.55E-03	3.35E-04	2.90E-03	8.59	3.32E-03
10/09/2016 15:30	30.88	34094.60	7.99	667.13	2.54E-03	3.33E-04	2.89E-03	8.86	3.31E-03
10/09/2016 16:00	30.92	34135.00	7.99	664.30	2.53E-03	3.33E-04	2.88E-03	8.92	3.30E-03
10/09/2016 16:30	30.99	34166.50	7.99	655.22	2.50E-03	3.29E-04	2.85E-03	8.85	3.26E-03
10/09/2016 17:00	31.06	34144.00	7.99	662.72	2.53E-03	3.33E-04	2.88E-03	8.77	3.30E-03
10/09/2016 17:30	31.09	34157.50	7.99	704.44	2.69E-03	3.57E-04	3.07E-03	8.51	3.51E-03
10/09/2016 18:00	31.14	34144.00	7.99	712.91	2.70E-03	3.55E-04	3.07E-03	8.43	3.51E-03
10/09/2016 18:30	31.18	34166.50	7.99	717.19	2.70E-03	3.55E-04	3.08E-03	8.59	3.52E-03
10/09/2016 19:00	31.23	34148.50	7.98	704.84	2.63E-03	3.43E-04	2.99E-03	8.62	3.42E-03
10/09/2016 19:30	31.30	34148.50	7.98	690.37	2.59E-03	3.38E-04	2.94E-03	9.00	3.37E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
10/09/2016 20:00	31.34	34198.10	7.98	683.13	2.56E-03	3.36E-04	2.91E-03	8.94	3.33E-03
10/09/2016 20:30	31.38	34171.00	7.98	684.16	2.56E-03	3.35E-04	2.91E-03	9.13	3.33E-03
10/09/2016 21:00	31.44	34202.60	7.98	654.03	2.44E-03	3.21E-04	2.78E-03	9.37	3.19E-03
10/09/2016 21:30	31.50	34220.70	7.98	640.48	2.37E-03	3.10E-04	2.70E-03	9.40	3.10E-03
11/09/2016 00:30	31.40	34243.40	7.99	672.78	2.57E-03	3.43E-04	2.92E-03	8.92	3.36E-03
11/09/2016 01:00	31.36	34243.40	7.99	653.76	2.49E-03	3.33E-04	2.84E-03	8.81	3.26E-03
11/09/2016 01:30	31.34	34220.70	7.99	643.83	2.47E-03	3.31E-04	2.81E-03	8.74	3.23E-03
11/09/2016 02:00	31.33	34252.40	7.99	664.81	2.54E-03	3.40E-04	2.90E-03	8.68	3.33E-03
11/09/2016 02:30	31.35	34220.70	7.99	679.40	2.59E-03	3.45E-04	2.95E-03	8.56	3.38E-03
11/09/2016 03:00	31.35	34189.10	7.99	675.19	2.57E-03	3.42E-04	2.92E-03	8.23	3.35E-03
11/09/2016 03:30	31.31	34211.70	7.99	725.88	2.74E-03	3.62E-04	3.12E-03	7.61	3.57E-03
11/09/2016 04:00	31.24	34189.10	7.98	718.42	2.66E-03	3.45E-04	3.03E-03	7.50	3.46E-03
11/09/2016 04:30	31.16	34148.50	7.98	714.06	2.66E-03	3.45E-04	3.02E-03	7.72	3.45E-03
11/09/2016 05:00	31.11	34135.00	7.98	706.62	2.63E-03	3.38E-04	2.98E-03	7.93	3.40E-03
11/09/2016 05:30	31.08	34144.00	7.98	682.66	2.54E-03	3.27E-04	2.88E-03	8.06	3.29E-03
11/09/2016 06:00	31.06	34126.00	7.98	696.17	2.58E-03	3.32E-04	2.93E-03	8.04	3.35E-03
11/09/2016 06:30	31.04	34144.00	7.97	712.94	2.61E-03	3.31E-04	2.96E-03	7.86	3.38E-03
11/09/2016 07:00	31.02	34126.00	7.97	691.51	2.54E-03	3.21E-04	2.87E-03	7.94	3.28E-03
11/09/2016 07:30	31.03	34144.00	7.97	681.74	2.49E-03	3.15E-04	2.83E-03	7.93	3.22E-03
11/09/2016 08:00	31.05	34126.00	7.97	688.89	2.51E-03	3.17E-04	2.85E-03	7.79	3.25E-03
11/09/2016 08:30	31.06	34135.00	7.97	715.07	2.58E-03	3.23E-04	2.93E-03	7.67	3.33E-03
11/09/2016 09:00	31.05	34166.50	7.97	710.39	2.57E-03	3.21E-04	2.91E-03	7.44	3.31E-03
11/09/2016 09:30	31.00	34112.50	7.96	725.66	2.59E-03	3.20E-04	2.93E-03	7.36	3.33E-03
11/09/2016 10:00	30.98	34126.00	7.96	746.27	2.67E-03	3.30E-04	3.02E-03	7.36	3.43E-03
11/09/2016 10:30	30.96	34103.50	7.96	759.72	2.69E-03	3.29E-04	3.04E-03	7.29	3.45E-03
11/09/2016 11:00	30.93	34112.50	7.96	769.05	2.72E-03	3.30E-04	3.07E-03	7.13	3.47E-03
11/09/2016 11:30	30.89	34094.60	7.96	779.39	2.74E-03	3.31E-04	3.09E-03	6.96	3.50E-03
11/09/2016 12:00	30.76	34049.70	7.96	759.55	2.68E-03	3.23E-04	3.02E-03	7.27	3.42E-03
11/09/2016 12:30	30.62	34027.40	7.96	741.65	2.63E-03	3.17E-04	2.97E-03	7.40	3.36E-03
11/09/2016 13:00	30.56	34018.40	7.96	719.37	2.57E-03	3.11E-04	2.90E-03	7.49	3.29E-03
11/09/2016 13:30	30.53	33996.10	7.96	713.43	2.56E-03	3.12E-04	2.89E-03	7.56	3.28E-03
11/09/2016 14:00	30.57	34005.10	7.97	707.15	2.56E-03	3.15E-04	2.90E-03	7.73	3.29E-03
11/09/2016 14:30	30.64	34018.40	7.97	702.55	2.56E-03	3.17E-04	2.89E-03	8.01	3.29E-03
11/09/2016 15:00	30.71	34058.70	7.97	680.89	2.49E-03	3.11E-04	2.82E-03	8.26	3.21E-03
11/09/2016 15:30	30.76	34058.70	7.97	659.93	2.43E-03	3.05E-04	2.75E-03	8.47	3.14E-03
11/09/2016 16:00	30.77	34058.70	7.98	644.01	2.39E-03	3.03E-04	2.71E-03	8.64	3.09E-03
11/09/2016 16:30	30.79	34058.70	7.98	640.39	2.39E-03	3.05E-04	2.71E-03	8.77	3.10E-03
11/09/2016 17:00	30.81	34058.70	7.98	642.87	2.42E-03	3.12E-04	2.75E-03	8.66	3.14E-03
11/09/2016 17:30	30.87	34058.70	7.99	623.45	2.35E-03	3.05E-04	2.67E-03	9.02	3.06E-03
11/09/2016 18:00	30.95	34081.10	7.99	611.19	2.31E-03	3.01E-04	2.63E-03	9.42	3.02E-03
11/09/2016 18:30	30.94	34040.80	7.99	601.96	2.30E-03	3.02E-04	2.62E-03	9.37	3.01E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
11/09/2016 19:00	30.93	34072.10	8.00	615.50	2.37E-03	3.15E-04	2.70E-03	9.23	3.11E-03
11/09/2016 19:30	30.91	34090.10	8.00	618.60	2.40E-03	3.20E-04	2.73E-03	8.87	3.14E-03
11/09/2016 21:00	30.94	34103.50	7.99	672.37	2.59E-03	3.43E-04	2.95E-03	8.13	3.38E-03
11/09/2016 21:30	30.95	34081.10	7.99	671.27	2.57E-03	3.39E-04	2.93E-03	7.86	3.35E-03
11/09/2016 22:00	30.99	34135.00	7.99	698.20	2.66E-03	3.50E-04	3.03E-03	7.56	3.47E-03
11/09/2016 22:30	31.00	34072.10	7.99	678.48	2.56E-03	3.33E-04	2.91E-03	7.55	3.33E-03
11/09/2016 23:00	30.98	34112.50	7.99	673.92	2.54E-03	3.30E-04	2.89E-03	7.57	3.30E-03
12/09/2016 00:00	30.93	34058.70	7.99	660.51	2.49E-03	3.23E-04	2.83E-03	7.51	3.24E-03
12/09/2016 00:30	30.92	34049.70	7.98	659.19	2.47E-03	3.19E-04	2.81E-03	7.44	3.21E-03
12/09/2016 01:00	30.91	34081.10	7.98	679.27	2.56E-03	3.31E-04	2.90E-03	7.28	3.32E-03
12/09/2016 01:30	30.91	34049.70	7.98	678.33	2.54E-03	3.27E-04	2.88E-03	7.25	3.29E-03
12/09/2016 02:00	30.91	34081.10	7.98	668.96	2.50E-03	3.20E-04	2.83E-03	7.18	3.24E-03
12/09/2016 02:30	30.90	34040.80	7.98	667.89	2.48E-03	3.16E-04	2.81E-03	6.96	3.21E-03
12/09/2016 03:00	30.88	34063.20	7.97	683.54	2.51E-03	3.16E-04	2.84E-03	6.71	3.24E-03
12/09/2016 03:30	30.78	34000.60	7.97	691.15	2.53E-03	3.17E-04	2.86E-03	6.35	3.26E-03
12/09/2016 04:30	30.60	33916.10	7.97	727.36	2.63E-03	3.24E-04	2.98E-03	6.04	3.38E-03
12/09/2016 05:00	30.60	33924.90	7.97	744.81	2.69E-03	3.30E-04	3.04E-03	5.82	3.45E-03
12/09/2016 05:30	30.76	33969.40	7.96	751.61	2.67E-03	3.25E-04	3.02E-03	5.70	3.42E-03
12/09/2016 06:00	30.85	34009.50	7.95	738.56	2.59E-03	3.13E-04	2.92E-03	5.70	3.31E-03
12/09/2016 06:30	30.85	34022.90	7.95	748.97	2.61E-03	3.12E-04	2.94E-03	5.56	3.33E-03
12/09/2016 08:30	30.69	33876.20	7.95	793.30	2.76E-03	3.28E-04	3.11E-03	4.96	3.52E-03
12/09/2016 16:30	30.64	33814.40	7.95	637.55	2.22E-03	2.63E-04	2.50E-03	7.35	2.84E-03
12/09/2016 17:00	30.64	33814.40	7.95	616.55	2.16E-03	2.58E-04	2.44E-03	7.57	2.78E-03
12/09/2016 18:30	30.79	33836.40	7.95	679.33	2.35E-03	2.79E-04	2.65E-03	7.03	3.01E-03
12/09/2016 19:30	30.80	33907.20	7.95	686.33	2.39E-03	2.85E-04	2.69E-03	7.19	3.05E-03
12/09/2016 20:00	30.80	33858.50	7.95	660.15	2.31E-03	2.76E-04	2.60E-03	7.45	2.95E-03
12/09/2016 20:30	30.76	33867.30	7.96	637.54	2.25E-03	2.72E-04	2.54E-03	7.86	2.89E-03
12/09/2016 21:00	30.70	33845.20	7.96	643.30	2.28E-03	2.75E-04	2.57E-03	7.69	2.92E-03
12/09/2016 21:30	30.65	33823.20	7.96	654.65	2.33E-03	2.83E-04	2.63E-03	7.62	3.00E-03
12/09/2016 22:00	30.61	33845.20	7.96	646.86	2.31E-03	2.82E-04	2.61E-03	7.48	2.97E-03
12/09/2016 22:30	30.58	33845.20	7.96	668.77	2.40E-03	2.93E-04	2.71E-03	7.33	3.09E-03
12/09/2016 23:00	30.59	33845.20	7.96	667.54	2.39E-03	2.90E-04	2.70E-03	7.37	3.07E-03
12/09/2016 23:30	30.57	33801.10	7.96	698.22	2.48E-03	2.99E-04	2.80E-03	7.17	3.17E-03
13/09/2016 00:00	30.55	33845.20	7.96	689.29	2.45E-03	2.94E-04	2.76E-03	7.04	3.13E-03
13/09/2016 00:30	30.53	33832.00	7.96	695.81	2.46E-03	2.95E-04	2.78E-03	6.95	3.15E-03
13/09/2016 01:00	30.53	33854.10	7.96	700.22	2.47E-03	2.95E-04	2.78E-03	6.94	3.15E-03
13/09/2016 02:00	30.43	33770.30	7.96	700.90	2.47E-03	2.93E-04	2.78E-03	7.17	3.15E-03
13/09/2016 02:30	30.46	33809.90	7.96	672.41	2.38E-03	2.83E-04	2.68E-03	7.11	3.04E-03
13/09/2016 03:00	30.39	33840.80	7.96	646.23	2.30E-03	2.75E-04	2.59E-03	7.55	2.94E-03
13/09/2016 03:30	30.31	33832.00	7.96	667.06	2.37E-03	2.83E-04	2.67E-03	7.51	3.03E-03
13/09/2016 04:00	30.21	33809.90	7.96	670.63	2.40E-03	2.88E-04	2.71E-03	7.29	3.07E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
13/09/2016 04:30	30.14	33818.80	7.96	682.95	2.45E-03	2.94E-04	2.76E-03	7.03	3.14E-03
13/09/2016 05:00	30.10	33840.80	7.96	693.44	2.49E-03	2.98E-04	2.81E-03	6.86	3.18E-03
13/09/2016 05:30	30.09	33818.80	7.96	731.92	2.62E-03	3.13E-04	2.96E-03	6.69	3.35E-03
13/09/2016 06:00	30.06	33827.60	7.96	706.07	2.54E-03	3.03E-04	2.86E-03	6.77	3.24E-03
13/09/2016 06:30	30.01	33796.70	7.96	704.10	2.53E-03	3.00E-04	2.84E-03	6.92	3.22E-03
13/09/2016 07:00	29.97	33809.90	7.96	685.56	2.46E-03	2.93E-04	2.78E-03	6.93	3.15E-03
13/09/2016 07:30	29.93	33805.50	7.96	696.12	2.50E-03	2.98E-04	2.82E-03	6.97	3.19E-03
13/09/2016 08:00	29.90	33796.70	7.96	684.94	2.47E-03	2.94E-04	2.78E-03	6.96	3.15E-03
13/09/2016 08:30	29.88	33805.50	7.96	700.83	2.52E-03	2.99E-04	2.84E-03	6.86	3.21E-03
13/09/2016 09:00	29.85	33774.70	7.97	696.05	2.52E-03	3.01E-04	2.84E-03	6.92	3.22E-03
13/09/2016 09:30	29.84	33779.10	7.97	697.60	2.53E-03	3.02E-04	2.85E-03	6.78	3.23E-03
13/09/2016 10:00	29.82	33818.80	7.97	713.80	2.59E-03	3.09E-04	2.91E-03	6.87	3.30E-03
13/09/2016 10:30	29.80	33774.70	7.97	704.20	2.57E-03	3.09E-04	2.90E-03	6.82	3.29E-03
13/09/2016 11:00	29.78	33744.00	7.97	727.95	2.65E-03	3.16E-04	2.98E-03	6.69	3.37E-03
13/09/2016 11:30	29.77	33774.70	7.97	736.30	2.68E-03	3.20E-04	3.02E-03	6.67	3.42E-03
13/09/2016 12:00	29.75	33774.70	7.97	731.36	2.67E-03	3.21E-04	3.01E-03	6.58	3.41E-03
13/09/2016 12:30	29.74	33787.90	7.97	745.69	2.72E-03	3.26E-04	3.07E-03	6.52	3.47E-03
13/09/2016 13:00	29.74	33726.50	7.97	746.42	2.73E-03	3.28E-04	3.08E-03	6.74	3.48E-03
13/09/2016 13:30	29.74	33765.90	7.97	745.84	2.74E-03	3.29E-04	3.09E-03	6.69	3.49E-03
13/09/2016 14:00	29.79	33726.50	7.97	719.94	2.63E-03	3.16E-04	2.97E-03	6.87	3.36E-03
13/09/2016 14:30	29.84	33787.90	7.97	714.21	2.61E-03	3.13E-04	2.94E-03	7.20	3.33E-03
13/09/2016 15:00	29.89	33748.40	7.97	723.32	2.66E-03	3.24E-04	3.01E-03	7.17	3.41E-03
13/09/2016 16:00	30.01	33787.90	7.97	709.69	2.59E-03	3.12E-04	2.92E-03	7.63	3.31E-03
13/09/2016 16:30	30.09	33818.80	7.97	702.21	2.58E-03	3.15E-04	2.91E-03	7.67	3.31E-03
13/09/2016 17:00	30.08	33779.10	7.97	749.42	2.76E-03	3.37E-04	3.11E-03	7.37	3.53E-03
13/09/2016 17:30	30.10	33840.80	7.97	725.62	2.66E-03	3.24E-04	3.00E-03	7.61	3.40E-03
14/09/2016 02:00	30.33	33933.80	8.01	655.24	2.64E-03	3.57E-04	3.01E-03	8.41	3.46E-03
14/09/2016 02:30	30.25	33929.40	8.01	673.87	2.72E-03	3.68E-04	3.11E-03	8.33	3.57E-03
14/09/2016 03:00	30.20	33911.60	8.01	677.06	2.72E-03	3.66E-04	3.11E-03	8.23	3.56E-03
14/09/2016 03:30	30.18	33911.60	8.01	675.58	2.72E-03	3.67E-04	3.11E-03	8.26	3.56E-03
14/09/2016 04:00	30.16	33951.60	8.01	656.44	2.65E-03	3.56E-04	3.02E-03	8.31	3.47E-03
14/09/2016 05:00	30.12	33929.40	8.01	664.41	2.68E-03	3.60E-04	3.06E-03	8.17	3.51E-03
14/09/2016 05:30	30.10	33920.50	8.01	668.00	2.69E-03	3.61E-04	3.07E-03	7.99	3.52E-03
14/09/2016 06:00	30.10	33880.60	8.01	675.36	2.71E-03	3.62E-04	3.09E-03	7.76	3.54E-03
14/09/2016 06:30	30.06	33858.50	8.01	669.02	2.68E-03	3.57E-04	3.05E-03	7.70	3.50E-03
14/09/2016 07:00	30.01	33840.80	8.01	663.67	2.64E-03	3.48E-04	3.00E-03	7.54	3.44E-03
14/09/2016 07:30	29.95	33876.20	8.01	668.83	2.66E-03	3.50E-04	3.03E-03	7.37	3.46E-03
14/09/2016 08:00	29.92	33836.40	8.00	682.58	2.70E-03	3.52E-04	3.07E-03	7.25	3.50E-03
14/09/2016 08:30	29.90	33867.30	8.00	677.09	2.66E-03	3.46E-04	3.03E-03	7.31	3.46E-03
14/09/2016 09:30	29.62	33805.50	8.00	777.14	3.03E-03	3.84E-04	3.43E-03	6.01	3.90E-03
14/09/2016 10:30	29.54	33783.50	7.98	800.16	3.01E-03	3.69E-04	3.40E-03	5.80	3.85E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
14/09/2016 11:00	29.51	33774.70	7.98	764.08	2.85E-03	3.45E-04	3.21E-03	6.06	3.64E-03
14/09/2016 11:30	29.52	33823.20	7.98	763.11	2.83E-03	3.42E-04	3.19E-03	6.10	3.61E-03
14/09/2016 12:30	29.50	33752.80	7.96	776.80	2.80E-03	3.27E-04	3.15E-03	6.11	3.55E-03
14/09/2016 13:00	29.48	33735.20	7.96	782.90	2.80E-03	3.26E-04	3.15E-03	6.12	3.55E-03
14/09/2016 13:30	29.47	33752.80	7.96	774.84	2.78E-03	3.23E-04	3.12E-03	6.22	3.52E-03
14/09/2016 14:00	29.48	33722.10	7.96	770.15	2.76E-03	3.22E-04	3.10E-03	6.37	3.50E-03
14/09/2016 14:30	29.52	33752.80	7.96	754.16	2.70E-03	3.14E-04	3.04E-03	6.66	3.42E-03
14/09/2016 15:00	29.57	33735.20	7.96	751.66	2.67E-03	3.09E-04	3.00E-03	6.81	3.38E-03
14/09/2016 15:30	29.62	33744.00	7.96	769.77	2.74E-03	3.17E-04	3.07E-03	6.92	3.46E-03
14/09/2016 16:30	29.77	33783.50	7.95	741.79	2.62E-03	3.03E-04	2.94E-03	7.48	3.32E-03
14/09/2016 17:00	29.87	33849.70	7.95	703.75	2.47E-03	2.85E-04	2.77E-03	7.81	3.13E-03
14/09/2016 17:30	29.99	33818.80	7.95	686.86	2.42E-03	2.83E-04	2.72E-03	8.06	3.08E-03
14/09/2016 18:30	30.17	33951.60	7.96	656.53	2.32E-03	2.74E-04	2.61E-03	8.60	2.96E-03
14/09/2016 19:00	30.23	33920.50	7.95	657.77	2.32E-03	2.73E-04	2.60E-03	8.72	2.95E-03
14/09/2016 19:30	30.29	33960.50	7.95	652.07	2.29E-03	2.70E-04	2.58E-03	9.12	2.92E-03
14/09/2016 20:00	30.35	33902.80	7.96	621.72	2.20E-03	2.63E-04	2.48E-03	9.30	2.82E-03
14/09/2016 20:30	30.39	33920.50	7.96	607.12	2.17E-03	2.61E-04	2.44E-03	9.53	2.78E-03
14/09/2016 21:00	30.41	33973.90	7.96	619.61	2.22E-03	2.68E-04	2.50E-03	9.64	2.85E-03
14/09/2016 21:30	30.45	33942.70	7.97	602.04	2.19E-03	2.70E-04	2.48E-03	9.84	2.83E-03
14/09/2016 22:00	30.47	33982.80	7.97	607.26	2.22E-03	2.74E-04	2.51E-03	9.78	2.87E-03
14/09/2016 22:30	30.47	34014.00	7.97	604.05	2.22E-03	2.77E-04	2.52E-03	9.78	2.88E-03
15/09/2016 00:00	30.42	33929.40	7.98	649.00	2.44E-03	3.10E-04	2.77E-03	9.39	3.16E-03
15/09/2016 00:30	30.41	33973.90	7.99	634.20	2.40E-03	3.06E-04	2.72E-03	9.33	3.12E-03
15/09/2016 01:00	30.42	33929.40	7.99	630.31	2.39E-03	3.07E-04	2.72E-03	9.46	3.11E-03
15/09/2016 01:30	30.46	33933.80	7.99	617.55	2.35E-03	3.02E-04	2.67E-03	9.73	3.05E-03
15/09/2016 02:00	30.47	33973.90	7.99	605.93	2.34E-03	3.04E-04	2.66E-03	9.80	3.05E-03
15/09/2016 02:30	30.47	33973.90	8.00	604.59	2.34E-03	3.06E-04	2.66E-03	9.77	3.05E-03
15/09/2016 03:30	30.37	33942.70	8.01	607.50	2.41E-03	3.21E-04	2.74E-03	9.34	3.16E-03
15/09/2016 04:00	30.33	33898.30	8.00	595.48	2.35E-03	3.10E-04	2.67E-03	9.10	3.07E-03
15/09/2016 04:30	30.30	33920.50	8.01	605.84	2.41E-03	3.22E-04	2.75E-03	8.94	3.16E-03
15/09/2016 05:30	30.00	33805.50	8.01	679.85	2.71E-03	3.58E-04	3.09E-03	7.70	3.53E-03
15/09/2016 06:00	29.87	33752.80	8.01	724.13	2.88E-03	3.77E-04	3.27E-03	7.12	3.74E-03
15/09/2016 06:30	29.78	33704.60	8.00	728.16	2.87E-03	3.71E-04	3.26E-03	6.72	3.71E-03
15/09/2016 07:00	29.71	33713.30	8.00	750.24	2.95E-03	3.81E-04	3.35E-03	6.46	3.82E-03
15/09/2016 07:30	29.67	33713.30	7.99	756.30	2.93E-03	3.71E-04	3.32E-03	6.33	3.77E-03
15/09/2016 08:00	29.63	33660.90	7.99	773.47	2.96E-03	3.70E-04	3.35E-03	6.31	3.80E-03
15/09/2016 08:30	29.61	33691.40	7.98	782.22	2.96E-03	3.65E-04	3.34E-03	6.22	3.79E-03
15/09/2016 09:00	29.58	33669.60	7.98	784.79	2.93E-03	3.56E-04	3.30E-03	6.17	3.74E-03
15/09/2016 09:30	29.55	33630.30	7.97	773.57	2.86E-03	3.44E-04	3.23E-03	6.28	3.65E-03
15/09/2016 10:00	29.53	33630.30	7.97	771.93	2.85E-03	3.41E-04	3.21E-03	6.18	3.63E-03
15/09/2016 10:30	29.50	33652.10	7.97	789.20	2.86E-03	3.37E-04	3.22E-03	6.12	3.63E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
15/09/2016 11:00	29.47	33621.60	7.96	771.39	2.79E-03	3.28E-04	3.14E-03	6.03	3.54E-03
15/09/2016 11:30	29.43	33639.10	7.96	798.37	2.85E-03	3.30E-04	3.20E-03	5.98	3.61E-03
15/09/2016 12:00	29.40	33608.60	7.96	786.08	2.80E-03	3.23E-04	3.14E-03	6.10	3.54E-03
15/09/2016 12:30	29.42	33639.10	7.95	772.89	2.72E-03	3.10E-04	3.05E-03	6.15	3.43E-03
15/09/2016 13:00	29.44	33621.60	7.95	750.47	2.64E-03	3.01E-04	2.96E-03	6.23	3.33E-03
15/09/2016 13:30	29.45	33591.20	7.95	744.73	2.60E-03	2.95E-04	2.92E-03	6.39	3.28E-03
15/09/2016 14:00	29.48	33599.90	7.95	750.47	2.63E-03	2.99E-04	2.95E-03	6.55	3.32E-03
15/09/2016 18:00	30.01	33774.70	7.95	624.21	2.17E-03	2.51E-04	2.44E-03	8.43	2.77E-03
15/09/2016 18:30	30.12	33787.90	7.95	659.14	2.29E-03	2.65E-04	2.57E-03	8.18	2.92E-03
15/09/2016 19:30	30.22	33796.70	7.95	641.94	2.24E-03	2.61E-04	2.52E-03	8.04	2.86E-03
15/09/2016 20:00	30.30	33849.70	7.95	638.35	2.23E-03	2.62E-04	2.51E-03	8.30	2.85E-03
15/09/2016 20:30	30.36	33849.70	7.95	643.15	2.25E-03	2.64E-04	2.53E-03	8.50	2.87E-03
15/09/2016 21:00	30.39	33871.80	7.96	644.81	2.28E-03	2.72E-04	2.57E-03	8.61	2.92E-03
15/09/2016 21:30	30.48	33880.60	7.95	651.53	2.29E-03	2.71E-04	2.57E-03	8.82	2.92E-03
15/09/2016 22:00	30.53	33902.80	7.95	641.40	2.25E-03	2.68E-04	2.54E-03	8.95	2.88E-03
15/09/2016 22:30	30.55	33920.50	7.95	644.41	2.27E-03	2.70E-04	2.55E-03	8.84	2.90E-03
15/09/2016 23:00	30.59	33973.90	7.96	640.73	2.27E-03	2.72E-04	2.56E-03	8.99	2.91E-03
15/09/2016 23:30	30.61	33920.50	7.96	625.07	2.22E-03	2.68E-04	2.51E-03	9.15	2.85E-03
16/09/2016 00:00	30.61	33933.80	7.96	617.03	2.21E-03	2.68E-04	2.49E-03	9.33	2.84E-03
16/09/2016 00:30	30.62	33964.90	7.96	603.09	2.17E-03	2.65E-04	2.45E-03	9.48	2.80E-03
16/09/2016 01:00	30.62	33951.60	7.97	614.46	2.23E-03	2.75E-04	2.52E-03	9.51	2.88E-03
16/09/2016 01:30	30.62	33933.80	7.97	615.98	2.25E-03	2.78E-04	2.54E-03	9.36	2.90E-03
16/09/2016 02:00	30.61	33951.60	7.97	636.78	2.34E-03	2.92E-04	2.65E-03	9.10	3.02E-03
16/09/2016 02:30	30.60	33951.60	7.98	633.39	2.34E-03	2.93E-04	2.65E-03	9.04	3.02E-03
16/09/2016 03:00	30.57	33942.70	7.98	722.11	2.66E-03	3.33E-04	3.01E-03	8.75	3.43E-03
16/09/2016 03:30	30.53	33920.50	7.98	648.84	2.41E-03	3.03E-04	2.73E-03	8.32	3.12E-03
16/09/2016 04:00	30.46	33911.60	7.98	699.01	2.60E-03	3.26E-04	2.94E-03	8.04	3.35E-03
16/09/2016 04:30	30.38	33849.70	7.98	760.65	2.83E-03	3.53E-04	3.20E-03	7.91	3.63E-03
16/09/2016 05:00	30.33	33818.80	7.98	688.60	2.56E-03	3.20E-04	2.90E-03	7.88	3.30E-03
16/09/2016 05:30	30.30	33836.40	7.97	720.57	2.66E-03	3.29E-04	3.01E-03	7.67	3.41E-03
16/09/2016 06:00	30.22	33818.80	7.98	725.92	2.71E-03	3.38E-04	3.06E-03	7.36	3.48E-03
16/09/2016 07:00	30.11	33744.00	7.97	781.66	2.88E-03	3.54E-04	3.26E-03	7.27	3.69E-03
16/09/2016 07:30	30.04	33744.00	7.97	733.44	2.67E-03	3.22E-04	3.01E-03	7.38	3.41E-03
16/09/2016 08:00	29.99	33752.80	7.97	736.27	2.70E-03	3.27E-04	3.04E-03	7.58	3.45E-03
16/09/2016 08:30	29.96	33765.90	7.97	722.67	2.64E-03	3.19E-04	2.98E-03	7.51	3.37E-03
16/09/2016 09:00	29.95	33792.30	7.97	721.65	2.63E-03	3.16E-04	2.96E-03	7.43	3.35E-03
16/09/2016 09:30	29.94	33774.70	7.97	740.45	2.69E-03	3.24E-04	3.04E-03	7.31	3.44E-03
16/09/2016 10:00	29.93	33783.50	7.97	746.87	2.70E-03	3.23E-04	3.05E-03	7.06	3.45E-03
16/09/2016 11:00	29.94	33761.60	7.96	782.59	2.80E-03	3.30E-04	3.15E-03	6.87	3.55E-03
16/09/2016 11:30	29.94	33792.30	7.96	740.23	2.65E-03	3.14E-04	2.98E-03	7.19	3.38E-03
16/09/2016 12:00	29.93	33823.20	7.96	751.75	2.68E-03	3.16E-04	3.02E-03	7.10	3.41E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
16/09/2016 12:30	29.92	33774.70	7.96	725.80	2.58E-03	3.04E-04	2.91E-03	7.31	3.29E-03
16/09/2016 13:00	29.92	33765.90	7.96	737.07	2.62E-03	3.08E-04	2.95E-03	7.32	3.33E-03
16/09/2016 13:30	29.94	33783.50	7.96	722.22	2.57E-03	3.02E-04	2.89E-03	7.51	3.27E-03
16/09/2016 14:00	29.99	33836.40	7.96	714.42	2.55E-03	3.01E-04	2.87E-03	7.59	3.25E-03
16/09/2016 14:30	30.02	33796.70	7.96	707.42	2.53E-03	3.01E-04	2.85E-03	7.71	3.23E-03
16/09/2016 15:00	30.06	33836.40	7.96	700.46	2.50E-03	2.97E-04	2.82E-03	7.85	3.19E-03
16/09/2016 15:30	30.13	33818.80	7.96	694.88	2.47E-03	2.93E-04	2.78E-03	8.09	3.15E-03
16/09/2016 16:30	30.32	33867.30	7.96	667.87	2.39E-03	2.87E-04	2.69E-03	8.83	3.06E-03
16/09/2016 17:00	30.35	33898.30	7.96	636.99	2.29E-03	2.78E-04	2.59E-03	8.88	2.95E-03
16/09/2016 17:30	30.45	33929.40	7.97	645.62	2.33E-03	2.85E-04	2.63E-03	9.04	3.00E-03
16/09/2016 18:00	30.53	33929.40	7.97	633.52	2.29E-03	2.80E-04	2.59E-03	9.14	2.95E-03
16/09/2016 18:30	30.61	33960.50	7.97	645.25	2.36E-03	2.92E-04	2.66E-03	9.29	3.04E-03
16/09/2016 19:00	30.67	33973.90	7.97	626.79	2.29E-03	2.84E-04	2.59E-03	9.45	2.95E-03
16/09/2016 19:30	30.73	33916.10	7.97	636.18	2.34E-03	2.94E-04	2.65E-03	9.55	3.03E-03
16/09/2016 20:30	30.83	34027.40	7.98	617.92	2.30E-03	2.93E-04	2.60E-03	9.62	2.98E-03
16/09/2016 21:00	30.88	34014.00	7.98	618.15	2.30E-03	2.93E-04	2.60E-03	9.75	2.98E-03
16/09/2016 21:30	30.90	34014.00	7.98	612.78	2.29E-03	2.93E-04	2.59E-03	9.84	2.97E-03
16/09/2016 22:00	30.95	34045.30	7.98	619.39	2.32E-03	3.01E-04	2.64E-03	10.19	3.03E-03
16/09/2016 22:30	30.93	34005.10	7.99	631.49	2.38E-03	3.09E-04	2.70E-03	9.98	3.10E-03
16/09/2016 23:00	30.88	33996.10	7.99	640.65	2.43E-03	3.18E-04	2.77E-03	9.60	3.17E-03
16/09/2016 23:30	30.86	33973.90	7.99	662.55	2.51E-03	3.25E-04	2.85E-03	9.11	3.26E-03
17/09/2016 00:00	30.85	33982.80	7.99	648.58	2.45E-03	3.17E-04	2.78E-03	9.17	3.18E-03
17/09/2016 00:30	30.81	33982.80	7.99	671.49	2.53E-03	3.27E-04	2.88E-03	8.45	3.29E-03
17/09/2016 01:00	30.74	33964.90	7.98	685.75	2.58E-03	3.32E-04	2.93E-03	8.14	3.35E-03
17/09/2016 01:30	30.72	33942.70	7.98	700.85	2.61E-03	3.32E-04	2.96E-03	8.11	3.38E-03
17/09/2016 02:00	30.66	33933.80	7.98	670.21	2.50E-03	3.18E-04	2.83E-03	8.05	3.24E-03
17/09/2016 02:30	30.61	33911.60	7.98	681.13	2.54E-03	3.22E-04	2.88E-03	7.87	3.29E-03
17/09/2016 03:00	30.47	33898.30	7.98	708.84	2.65E-03	3.35E-04	3.00E-03	7.55	3.42E-03
17/09/2016 03:30	30.42	33911.60	7.98	725.45	2.71E-03	3.41E-04	3.07E-03	7.48	3.49E-03
17/09/2016 04:00	30.33	33889.50	7.98	699.97	2.59E-03	3.23E-04	2.94E-03	7.42	3.34E-03
17/09/2016 04:30	30.24	33849.70	7.98	734.21	2.73E-03	3.39E-04	3.08E-03	7.34	3.50E-03
17/09/2016 05:00	30.16	33836.40	7.98	721.44	2.69E-03	3.34E-04	3.04E-03	7.35	3.45E-03
17/09/2016 05:30	30.13	33845.20	7.98	720.92	2.67E-03	3.30E-04	3.02E-03	7.29	3.43E-03
17/09/2016 06:00	30.12	33836.40	7.97	727.25	2.68E-03	3.28E-04	3.02E-03	7.24	3.43E-03
17/09/2016 06:30	30.10	33805.50	7.97	716.23	2.64E-03	3.24E-04	2.98E-03	7.22	3.39E-03
17/09/2016 07:00	30.08	33783.50	7.97	719.97	2.63E-03	3.20E-04	2.97E-03	7.18	3.37E-03
17/09/2016 07:30	30.09	33796.70	7.97	733.27	2.67E-03	3.24E-04	3.01E-03	6.95	3.42E-03
17/09/2016 08:00	30.11	33814.40	7.97	745.70	2.71E-03	3.29E-04	3.06E-03	7.04	3.47E-03
17/09/2016 08:30	30.09	33814.40	7.97	735.44	2.66E-03	3.20E-04	3.00E-03	7.07	3.40E-03
17/09/2016 09:00	30.08	33805.50	7.96	762.64	2.75E-03	3.30E-04	3.10E-03	6.94	3.51E-03
17/09/2016 09:30	30.05	33796.70	7.97	752.55	2.72E-03	3.26E-04	3.06E-03	6.91	3.47E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
17/09/2016 10:00	30.02	33752.80	7.96	784.00	2.81E-03	3.35E-04	3.17E-03	6.80	3.58E-03
17/09/2016 10:30	30.00	33774.70	7.96	750.08	2.68E-03	3.18E-04	3.02E-03	6.67	3.41E-03
17/09/2016 11:00	29.99	33783.50	7.96	783.56	2.79E-03	3.30E-04	3.14E-03	6.54	3.55E-03
17/09/2016 11:30	30.00	33774.70	7.96	784.80	2.79E-03	3.28E-04	3.14E-03	6.69	3.54E-03
17/09/2016 12:00	30.03	33783.50	7.96	730.94	2.58E-03	3.02E-04	2.90E-03	6.94	3.28E-03
17/09/2016 12:30	30.07	33805.50	7.96	725.70	2.57E-03	3.03E-04	2.89E-03	7.09	3.27E-03
17/09/2016 13:00	30.12	33805.50	7.95	715.08	2.52E-03	2.95E-04	2.83E-03	7.21	3.20E-03
17/09/2016 13:30	30.15	33845.20	7.95	706.86	2.47E-03	2.87E-04	2.77E-03	7.40	3.14E-03
17/09/2016 14:00	30.20	33849.70	7.95	686.93	2.41E-03	2.83E-04	2.71E-03	7.67	3.08E-03
17/09/2016 14:30	30.24	33836.40	7.96	674.90	2.39E-03	2.83E-04	2.69E-03	7.84	3.05E-03
17/09/2016 15:00	30.29	33867.30	7.96	665.43	2.36E-03	2.82E-04	2.66E-03	8.05	3.02E-03
17/09/2016 15:30	30.33	33929.40	7.96	665.67	2.37E-03	2.84E-04	2.67E-03	7.95	3.03E-03
17/09/2016 16:00	30.40	33898.30	7.96	676.52	2.42E-03	2.92E-04	2.73E-03	8.35	3.10E-03
17/09/2016 16:30	30.46	33938.30	7.96	659.48	2.37E-03	2.88E-04	2.68E-03	8.56	3.04E-03
17/09/2016 17:00	30.53	33929.40	7.96	614.40	2.21E-03	2.69E-04	2.49E-03	8.74	2.84E-03
17/09/2016 17:30	30.58	33911.60	7.96	645.97	2.28E-03	2.74E-04	2.57E-03	8.82	2.93E-03
17/09/2016 18:00	30.65	33973.90	7.96	649.25	2.31E-03	2.80E-04	2.61E-03	9.21	2.97E-03
17/09/2016 18:30	30.77	34036.30	7.96	625.15	2.24E-03	2.75E-04	2.53E-03	9.45	2.89E-03
17/09/2016 19:00	30.82	34036.30	7.97	626.47	2.27E-03	2.81E-04	2.56E-03	9.69	2.93E-03
17/09/2016 19:30	30.91	33996.10	7.97	632.33	2.30E-03	2.87E-04	2.60E-03	9.58	2.97E-03
17/09/2016 20:00	30.99	34045.30	7.97	597.98	2.18E-03	2.73E-04	2.46E-03	9.96	2.82E-03
17/09/2016 20:30	31.07	34099.00	7.97	628.09	2.29E-03	2.90E-04	2.60E-03	9.47	2.97E-03
17/09/2016 21:00	31.12	34067.70	7.97	636.39	2.33E-03	2.95E-04	2.64E-03	9.06	3.02E-03
17/09/2016 21:30	31.14	34081.10	7.97	639.54	2.33E-03	2.96E-04	2.64E-03	9.02	3.02E-03
17/09/2016 22:00	31.16	34130.50	7.97	632.48	2.30E-03	2.91E-04	2.61E-03	9.24	2.98E-03
17/09/2016 22:30	31.14	34099.00	7.97	631.97	2.32E-03	2.96E-04	2.63E-03	9.26	3.01E-03
17/09/2016 23:00	31.15	34090.10	7.97	630.90	2.31E-03	2.95E-04	2.62E-03	9.07	3.00E-03
17/09/2016 23:30	31.11	34090.10	7.98	655.35	2.41E-03	3.08E-04	2.74E-03	8.82	3.13E-03
18/09/2016 00:30	31.05	34027.40	7.97	647.56	2.38E-03	3.02E-04	2.70E-03	8.60	3.08E-03
18/09/2016 01:00	31.04	34005.10	7.97	651.93	2.40E-03	3.04E-04	2.72E-03	8.36	3.10E-03
18/09/2016 01:30	31.02	34036.30	7.98	699.02	2.57E-03	3.27E-04	2.91E-03	8.18	3.32E-03
18/09/2016 02:00	31.00	34027.40	7.97	665.51	2.42E-03	3.04E-04	2.74E-03	8.16	3.13E-03
18/09/2016 02:30	31.00	34036.30	7.97	676.04	2.46E-03	3.08E-04	2.78E-03	7.72	3.17E-03
18/09/2016 03:00	30.99	34018.40	7.97	675.79	2.44E-03	3.04E-04	2.76E-03	7.65	3.14E-03
18/09/2016 03:30	30.98	34036.30	7.97	701.20	2.53E-03	3.16E-04	2.87E-03	7.68	3.26E-03
18/09/2016 04:00	30.98	34027.40	7.97	706.79	2.56E-03	3.20E-04	2.90E-03	7.19	3.30E-03
18/09/2016 05:00	30.91	33933.80	7.96	761.08	2.70E-03	3.30E-04	3.05E-03	7.25	3.46E-03
18/09/2016 05:30	30.89	33902.80	7.96	718.98	2.55E-03	3.11E-04	2.88E-03	7.27	3.27E-03
18/09/2016 06:00	30.86	33902.80	7.96	717.24	2.55E-03	3.11E-04	2.88E-03	7.23	3.27E-03
18/09/2016 06:30	30.84	33871.80	7.96	737.22	2.61E-03	3.18E-04	2.95E-03	7.25	3.35E-03
18/09/2016 07:00	30.80	33911.60	7.96	737.49	2.60E-03	3.14E-04	2.93E-03	7.18	3.33E-03

Fecha	T (°C)	C (µS/cm)	pH	pCO <sub>2</sub> (µatm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mol/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mol/kg)	DIC (mol/kg)	OD (mg/L)	Alc (mol/kg)
18/09/2016 07:30	30.77	33871.80	7.95	727.41	2.55E-03	3.07E-04	2.88E-03	6.98	3.26E-03
18/09/2016 08:00	30.74	33911.60	7.95	745.43	2.61E-03	3.13E-04	2.95E-03	6.82	3.34E-03
18/09/2016 08:30	30.70	33871.80	7.95	742.83	2.58E-03	3.07E-04	2.91E-03	6.80	3.29E-03
18/09/2016 18:00	31.00	33920.50	7.95	613.61	2.12E-03	2.54E-04	2.39E-03	9.51	2.73E-03
18/09/2016 18:30	31.04	33951.60	7.95	613.53	2.14E-03	2.59E-04	2.42E-03	9.64	2.76E-03
18/09/2016 19:00	31.08	33964.90	7.95	624.97	2.19E-03	2.67E-04	2.47E-03	9.69	2.82E-03
18/09/2016 19:30	31.10	33956.00	7.96	623.63	2.21E-03	2.71E-04	2.49E-03	9.85	2.85E-03
18/09/2016 20:00	31.14	34014.00	7.96	630.28	2.23E-03	2.73E-04	2.51E-03	9.90	2.87E-03
18/09/2016 20:30	31.19	34027.40	7.96	626.30	2.22E-03	2.74E-04	2.51E-03	9.62	2.86E-03
18/09/2016 21:00	31.25	34036.30	7.96	622.07	2.22E-03	2.77E-04	2.52E-03	9.93	2.88E-03
18/09/2016 21:30	31.29	34058.70	7.96	643.57	2.30E-03	2.87E-04	2.60E-03	10.07	2.97E-03
18/09/2016 22:00	31.28	34099.00	7.97	608.86	2.18E-03	2.74E-04	2.47E-03	9.95	2.83E-03
18/09/2016 22:30	31.28	34058.70	7.97	660.12	2.38E-03	3.01E-04	2.70E-03	9.86	3.09E-03
18/09/2016 23:00	31.29	34058.70	7.97	646.91	2.34E-03	2.96E-04	2.65E-03	9.84	3.03E-03
18/09/2016 23:30	31.29	34076.60	7.97	641.92	2.33E-03	2.97E-04	2.65E-03	9.61	3.03E-03
19/09/2016 00:00	31.28	34027.40	7.97	670.05	2.43E-03	3.08E-04	2.76E-03	9.35	3.15E-03
19/09/2016 00:30	31.28	34005.10	7.97	674.29	2.45E-03	3.10E-04	2.77E-03	8.97	3.17E-03
19/09/2016 01:00	31.41	34067.70	7.97	644.27	2.33E-03	2.97E-04	2.65E-03	8.85	3.03E-03
19/09/2016 01:30	31.41	34058.70	7.97	662.00	2.41E-03	3.08E-04	2.74E-03	8.97	3.13E-03
19/09/2016 02:00	31.41	34081.10	7.97	649.69	2.37E-03	3.04E-04	2.69E-03	8.77	3.08E-03
19/09/2016 02:30	31.41	34099.00	7.98	659.83	2.42E-03	3.12E-04	2.75E-03	8.72	3.15E-03
19/09/2016 03:00	31.40	34049.70	7.98	659.89	2.42E-03	3.12E-04	2.75E-03	8.54	3.15E-03
19/09/2016 03:30	31.39	34067.70	7.97	658.27	2.40E-03	3.07E-04	2.73E-03	8.38	3.12E-03
19/09/2016 04:00	31.36	34058.70	7.97	653.01	2.39E-03	3.06E-04	2.71E-03	8.18	3.10E-03
19/09/2016 04:30	31.33	33996.10	7.97	699.19	2.53E-03	3.21E-04	2.87E-03	7.72	3.28E-03
19/09/2016 05:00	31.28	34018.40	7.97	707.70	2.56E-03	3.24E-04	2.90E-03	7.33	3.31E-03
19/09/2016 06:00	31.28	33964.90	7.96	735.57	2.63E-03	3.28E-04	2.98E-03	7.08	3.39E-03
19/09/2016 06:30	31.30	33996.10	7.96	747.88	2.65E-03	3.29E-04	3.00E-03	6.85	3.41E-03
19/09/2016 07:30	31.17	33854.10	7.96	759.39	2.69E-03	3.32E-04	3.04E-03	7.06	3.46E-03
19/09/2016 08:00	31.16	33849.70	7.96	761.91	2.69E-03	3.31E-04	3.04E-03	6.94	3.45E-03
19/09/2016 09:00	31.08	33862.90	7.96	755.82	2.65E-03	3.23E-04	3.00E-03	7.17	3.40E-03
19/09/2016 09:30	31.05	33880.60	7.95	742.23	2.59E-03	3.13E-04	2.92E-03	6.95	3.32E-03
19/09/2016 10:00	31.01	33889.50	7.95	753.06	2.62E-03	3.14E-04	2.95E-03	6.82	3.34E-03
22/09/2016 00:00	30.87	34049.70	7.99	726.56	2.77E-03	3.61E-04	3.14E-03	7.87	3.59E-03