



Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

**Estudio del arrecife postglacial en la costa suroeste de
Tahití**

TESIS

Para obtener el grado académico de:

Maestro en Ciencias
(Geología Marina)

presenta:

MARIAN PATRICIA GRANADOS COREA

Director de Tesis:

Dr. Blanchon Paul

Comité Tutorial:

Dra. Caballero Miranda Margarita

Dr. Carranza Edwards Arturo

Dr. Bernal Uruchurtu Juan Pablo

Dr. Reyes Bonilla Héctor

México D.F., Junio, 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mis tíos y mi novio por toda la comprensión y el apoyo brindado.

A CONACYT por la beca otorgada durante la maestría.

Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por todas las facilidades y los servicios prestados.

A la Lic. Ma. Erendira Corea Montiel y al M.C. Edgardo M. López Valerio por su revisión al escrito.

A los miembros del comité por su participación y aportaciones.

A la M.C. Rosa E. Rodríguez Martínez por haber realizado importantes correcciones a la tesis.

A la Unidad Académica de Puerto Morelos por todos los conocimientos que adquirí y por el maravilloso tiempo que pase durante la maestría.

A mi director de tesis el Dr. Paul Blanchon por todos los conocimientos transmitidos.

CARPE DIEM... Thanks for everything Paul.

RESUMEN

Actualmente está ocurriendo un calentamiento global, que está provocando el derretimiento de las capas de hielo continentales y el aumento en el nivel del mar. El flujo de agua dulce a los océanos probablemente afectará la circulación termohalina y, por lo tanto, el clima global, lo que podría tener consecuencias catastróficas para todos los seres vivos. Reconstruir cambios en el nivel del mar en épocas pasadas nos permite entender la dinámica de las capas de hielo continentales y sus efectos en la superficie terrestre. Los paleoarrecifes son excelentes indicadores de las fluctuaciones en el nivel del mar y han permitido identificar que en el pasado ocurrieron aumentos abruptos, llamados Pulsos de derretimiento de agua o Mwp (por sus siglas en inglés) como consecuencia del deshielo de las capas continentales. La resolución de los registros de cambios en el nivel del mar, que abarcan el periodo postglacial, aún son insuficientes para obtener conclusiones sobre los cambios del nivel del mar asociados a los Mwp y al estadio frío *Younger Dryas*.

En el presente estudio se analizaron núcleos provenientes de 11 pozos perforados en el paleoarrecife de Mara'a, en la costa suroeste de Tahití, obtenidos en el proyecto IODP-310. Se desarrollo y empleo un protocolo para la descripción visual de núcleos. Se usaron fechamientos previos de $^{230}\text{Th}/\text{U}$ y ^{14}C corregidos por el efecto de reservorio y calibrados a edades calendario. Se construyó un curva de nivel de mar con datos de Papeete y con los obtenidos en el presente estudio, con base en ésta curva se obtuvieron las profundidades ambientales de cada colonia fechada.

En Mara'a se identificaron cinco facies cuya correlación estratigráfica permitió el desarrollo de un modelo geocronológico y de un modelo de zonación. Esta información permitió identificar tres eventos que influenciaron el desarrollo arrecifal en Tahití. El primer evento fue el ahogamiento del arrecife glacial a causa del Mwp-1a (14.65 a 14 ka) que tuvo un aumento en el nivel del mar de 23.5 m, éste evento presentó una irregularidad a los ~14.3 ka, identificada por el breve establecimiento de un arrecife bordeante en Mara'a y Tiarei. El segundo evento fue un estadio bajo en el nivel del mar correspondiente con el evento *Younger Dryas* (~12.3 ka), que permitió el establecimiento de corales de menor

profundidad, tanto en Mara'a como en Papeete. El tercer evento consistió en un cambio en la dominancia de corales ramificados por corales en forma de hoja durante el Mwp-1b (11 a 11.5 ka).

Los resultados obtenidos fueron más precisos y confiables con respecto a la temporalidad, duración y la manera en que estos eventos influenciaron el desarrollo arrecifal, que los obtenidos en estudios anteriores. Las principales aportaciones fueron la diferenciación de los dos eventos que constituyen el Mwp-1a y la irregularidad que presentó a la mitad de éstos dos eventos, la identificación del *Younger Dryas* y su efecto sobre el desarrollo arrecifal, y el reconocimiento del Mwp-1b en Mara'a.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN. **9**

- 1.1 Antecedentes. **10**
 - 1.1.1 Paleoarrecifes como indicadores proximales del nivel del mar. **12**
 - 1.1.2 Problemática en la identificación de eventos que influenciaron el desarrollo arrecifal. **14**
- 1.2 Hipótesis. **16**
- 1.3 Objetivos. **16**
- 1.4 Marco Geológico. **17**
 - 1.4.1 Ubicación y Geografía. **17**
 - 1.4.2 Geología. **18**
 - 1.4.3 Océanos y Clima. **18**
 - 1.4.4 Arrecifes. **21**

CAPITULO 2. UBICACIÓN Y MÉTODOS. **23**

- 2.1 Ubicación. **24**
- 2.2 Métodos. **26**
 - 2.2.1 Obtención de núcleos. **26**
 - 2.2.2 Imágenes de alta resolución. **27**
 - 2.2.3 Fechamientos. **27**
 - 2.2.4 Descripción de núcleos. **29**

CAPITULO 3. RESULTADOS. **33**

- 3.1 Identificación de facies. **34**
- 3.2 Descripción de facies. **40**
- 3.3 Interpretación de facies. **54**
- 3.4 Modelo de zonación. **57**
- 3.5 Historia del desarrollo arrecifal. **59**
- 3.6 Correlación de Mara'a con otros sitios en Tahití. **63**

- 3.6.1 Tiarei. **63**
- 3.6.2 Núcleos “P” de Papeete. **65**

CAPITULO 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES. 67

- 4.1 Discusión de resultados. **68**
 - 4.1.1 Límites en la interpretación. **70**
 - 4.1.2 Comparación con trabajos previos. **71**
- 4.2 Conclusiones. **79**

REFERENCIAS. 80

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

Figura 1. Curva del nivel del mar. **13**

Figura 2. A) Mapa topográfico de Tahití. B) Ubicación de Tahití en el Archipiélago de la Sociedad. C) Mapa geológico. **17**

Figura 3. Batimetría y promedios anuales de corrientes para Papeete, Tiarei y Mara'a. **20**

Figura 4. Sección transversal de las zonas en los arrecifes de Tahití. **22**

Figura 5. A) Ubicación de Mara'a en la parte sur de Tahití. B) Sitios perforados. C) Mapa batimétrico. **24**

Figura 6. Ubicación de los pozos perforados con respecto a la cresta arrecifal actual. **25**

Figura 7. Simbología utilizada en la descripción de núcleos con base en el Protocolo. **32**

Figura 8. Resumen de sitio 7, conformado por los pozos 7A, 7B y 7C. **34**

Figura 9. Resumen de sitio 5, conformado por los pozos 5A, 5B, 5C y 5D. **35**

Figura 10. Resumen de sitio 17. **36**

Figura 11. Resumen de sitio 15. **37**

Figura 12. Resumen de sitio 18. **38**

Figura 13. Resumen de sitio 16. **39**

Figura 14. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 1.1. **42**

Figura 15. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 1.2. **43**

Figura 16. Imagen en alta resolución que pertenece a la subfacies 1.3. **44**

- Figura 17. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.1. **46**
- Figura 18. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.2. **47**
- Figura 19. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.3. **48**
- Figura 20. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 3. **50**
- Figura 21. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 4. **51**
- Figura 22. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 5. **53**
- Figura 23. Correlación estratigráfica de todos los sitios en Mara´a. **55**
- Figura 24. Obtención de las profundidades de ámbito de crecimiento de los corales fechados. **58**
- Figura 25. Modelo de zonación para la zona Sur de Tahití. **58**
- Figura 26. Modelo de edades del desarrollo arrecifal. **60**
- Figura 27. Historia del desarrollo arrecifal en la parte sur de Tahití. **61**
- Figura 28. Pozo 23A de Tiarei en relación con los sitios 7, 5 y 15 de Mara´a. **64**
- Figura 29. Núcleos “P” modificado de Cabioch *et al.*, 1999. **66**
- Figura 30. Diferencias del presente trabajo con respecto a los trabajos de Abbey *et al.*, 2011 y Seard *et al.*, 2011. **73**
- Tabla 1. Numero de muestra, Edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y ^{14}C , profundidad corregida por subsidencia y paleopropundidades. **28**
- Tabla 2. Protocolo para descripción de núcleos. **30**

SIMBOLOGÍA

GÉNEROS	
 <i>Acropora</i>	 <i>Pocillopora</i>
 <i>Porites</i>	 <i>Agaricia</i>
 Colonias de coral menos frecuentes	

RAMIFICADOS	
	Delgados largos
	Delgados cortos
	Intermedios largos
	Intermedios cortos
	Robustos largos
	Robustos cortos

PLACAS	
	Delgada
	Gruesa
	Placa en forma de Copa

HOJAS	
	Sencilla

MASIVOS	
	Pequeños
	Medianos

CONDICION del CORAL	
	cCA
	cCA con verméticos

OTROS	
	Colonias encostrantes

CONTACTOS	
	Directo entre Facies
	Transicional
	Inferido
	Directo entre SubFacies
	Transicional
	Inferido

DATACIONES	
	U/Th Calibradas

MARCO ARRECIFAL	
	Biofabrica Dispersa
	Biofabrica Agregada
	Biofabrica Compacta

ELEMENTOS DETRITOS	
	Grava con Textura Granular
	Grava con Textura Lodogranular
	Grava o arena con Terrigenos

CARAC. de PERFORACION	
	Nula recuperación
	Núcleo perturbado

BASAMENTO	
	Pleistoceno

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El creciente aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases en la atmósfera, proveniente del uso de combustibles fósiles, ha intensificado el efecto invernadero y provocado un aumento en la temperatura del planeta. Debido al incremento en la temperatura y el consecuente derretimiento de las capas de hielo en los casquetes polares, podrían enfrentarse en un futuro cambios ambientales análogos a los de la última deglaciación (Fairbanks, 1989). Estudios geológicos demuestran que el derretimiento de las capas de hielo que se ubicaban sobre el continente y la subsecuente incorporación de grandes cantidades de agua dulce al océano, pueden incrementar abruptamente el nivel del mar (Blanchon, 2011). Este fenómeno se conoce como “Pulsos de derretimiento de agua” o Mwp (*Melt water pulse*, por sus siglas en inglés).

Actualmente, existen dos grandes capas de hielo, una localizada en Groenlandia y otra en la Antártida Occidental, con altas posibilidades de colapsar en caso de que el calentamiento global de la atmósfera y de la superficie oceánica continúe a la tasa de cambio actual (Blanchon y Shaw 1995). El aumento en el nivel del mar provocaría efectos devastadores en las zonas costeras, amenazando a las poblaciones humanas y ecosistemas. Entre otros daños, provocaría inundaciones y erosión, con la subsecuente desaparición de playas, islas, islas barreras, deltas, humedales y esteros (Herguera y Ortiz, 2009). Adicionalmente, los Mwp pueden inducir ahogamiento arrecifal (Blanchon y Shaw, 1995) seguido por largos periodos en los que no ocurre acreción en el arrecife (Montaggioni, 2005). En el presente trabajo se maneja el término “ahogamiento arrecifal” con el fin de conservar el termino *drowned reef* (arrecife ahogado, por sus siglas en ingles) que ha sido utilizado en todos los trabajos publicados hasta la fecha, aunque éste término más bien se refiere a que el arrecife muere cuando el nivel del mar asciende, y deja a las colonias de coral bajo un tirante de agua mayor del que toleran.

La última deglaciación abarcó el periodo comprendido entre ~20 a 6 ka A.P. (antes del presente) y provocó un aumento en el nivel del mar de ~120 m (Fairbanks, 1989). Ésta transición de condiciones glaciales a interglaciares comprendió reorganizaciones repentinas de las capas de hielo, océanos y sistemas atmosféricos (Blanchon y Shaw, 1995). El incremento en el nivel del mar durante esta deglaciación no fue constante sino que consistió en dos aumentos abruptos: Mwp-1a (14.65 a 14 ka) y Mwp-1b (11.5 a 11 ka). Estos eventos están separados por el intervalo conocido como *Younger Dryas* (12.9 a 11.5 ka AP) que fue un breve retorno a condiciones cercanas a un clima glacial, y que produjo un estadio bajo en el nivel del mar (Blanchon y Shaw 1995).

Una forma de identificar las variaciones en el nivel del mar y sus posibles efectos, es estudiando eventos postglaciares pasados ya que el pasado es la clave del futuro. Esto se ha realizado de diferentes formas, por ejemplo, Blanchon y Shaw (1993) indican que mediante fechamiento de diacictons terrestres y sumergidos en la costa nroete del estrecho de Hudson, que el domo de Laborador tuvo eventos de deshielo importantes entre 14 y 11.5 ka, esto es coincidentes con los Mwp1a y 1b.

Otro ejemplo, son los estudios realizados en la Plataforma Sunda, en Asia, donde se fecharon más de 50 núcleos de sedimento, cinco de los cuales contenían depósitos de turbas de manglar. Con estas muestras de materia orgánica, detallaron el inicio del Mwp-1a a una edad de 14.6 ka a una profundidad de 96 a 80 m (Hanebuth *et al.*, 2000).

También se han realizado estudios en cuencas aisladas, como el de Stein y colaboradores (2010) en el lago prehistórico Lisa, ubicado en el Mar Muerto, Jordania. Debido a que en el Este del Mediterráneo, durante periodos de calentamiento global las condiciones se vuelven áridas y durante periodos fríos se vuelven húmedas, los descensos en el nivel del lago son asociados con condiciones de altas temperaturas y los ascensos con bajas temperaturas. Estos autores reportan las siguientes variaciones en el nivel del lago: en el periodo de 16 a 15 ka se tuvo un nivel de ~260 m bnpm (bajo el nivel promedio del mar), a los ~14 ka (Mwp-1a) ocurrió un descenso a 465 m bnpm, de 13 a 11 ka (*Younger Dryas*) observaron un aumento a 400 m bnpm y de 11 a 10 ka (Mwp-1b) un nuevo descenso en el nivel del lago, y la presencia de una capa gruesa de sal, depositada durante condiciones de altas temperaturas.

Entre los datos con mayor continuidad, se encuentran los reportados por estudios con núcleos de hielo de los casquetes polares. Carlson (2011) llevo a cabo análisis de variaciones en la temperatura de Groenlandia, mediante isotopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en núcleos de hielo. Este autor muestra un aumento en las temperaturas durante el evento cálido del Bölling Allerod (14.6-13 ka) con el valor más alto (-32 °C) a los ~14.6 ka (Mwp-1a), éste periodo cálido fue seguido por temperaturas bajas (-50 °C) que iniciaron a los ~13 ka, para posteriormente aumentar abruptamente (-36 °C) a los 11.5 ka (Mwp-1b). También utilizó indicadores del retraimiento glacial, isotopos cosmogénicos en cantos rodados, con los que identificó el inicio del derretimiento de las capas de hielo del máximo glacial, en el Oeste de la Antártica, entre los 15 y los 14 ka.

1.1.1 PALEOARRECIFES COMO INDICADORES PROXIMALES DEL NIVEL DEL MAR

Otra manera de identificar directamente variaciones en el nivel del mar, es mediante el estudio de arrecifes coralinos fósiles o paleoarrecifes, ya que los corales escleractinios solamente pueden crecer en hábitats y condiciones ambientales muy particulares. El fechamiento de corales permite identificar eventos que provocaron cambios en el desarrollo arrecifal postglacial y entender los mecanismos que manejaron los ciclos glacial-interglacial durante el Cuaternario.

Diferentes estudios han demostrado que los paleoarrecifes permiten identificar los aumentos rápidos en el nivel del mar (Blanchon y Shaw, 1995; Cabioch, 1999). Núcleos obtenidos en los arrecifes de Barbados, permitieron identificar los dos pulsos de agua, el Mwp-1a y el Mwp-1b mediante el uso de fechamientos de ^{14}C (isotopo radioactivo del carbono) (Fairbanks, 1989) y U/Th (Uranio/Torio) (Bard *et al.*, 1990). El Mwp-1a fue establecido de 14.2 a 13.8 ka cal (calendario) y el Mwp-1b de 11.5 a 11.1 ka cal AP, períodos en los que el nivel del mar se elevó de 94 a 74 m y de 58 a 43 m respectivamente (Fairbanks1989). Los Mwp fueron detectados como hiatos dentro de tres arrecifes separados, y cada uno de los segmentos se encontró desfasado del otro. Estas separaciones coinciden con la interpretación del ahogamiento de los arrecifes (Fairbanks1989), e impiden una reconstrucción precisa de la respuesta arrecifal a los cambios en el nivel del mar.

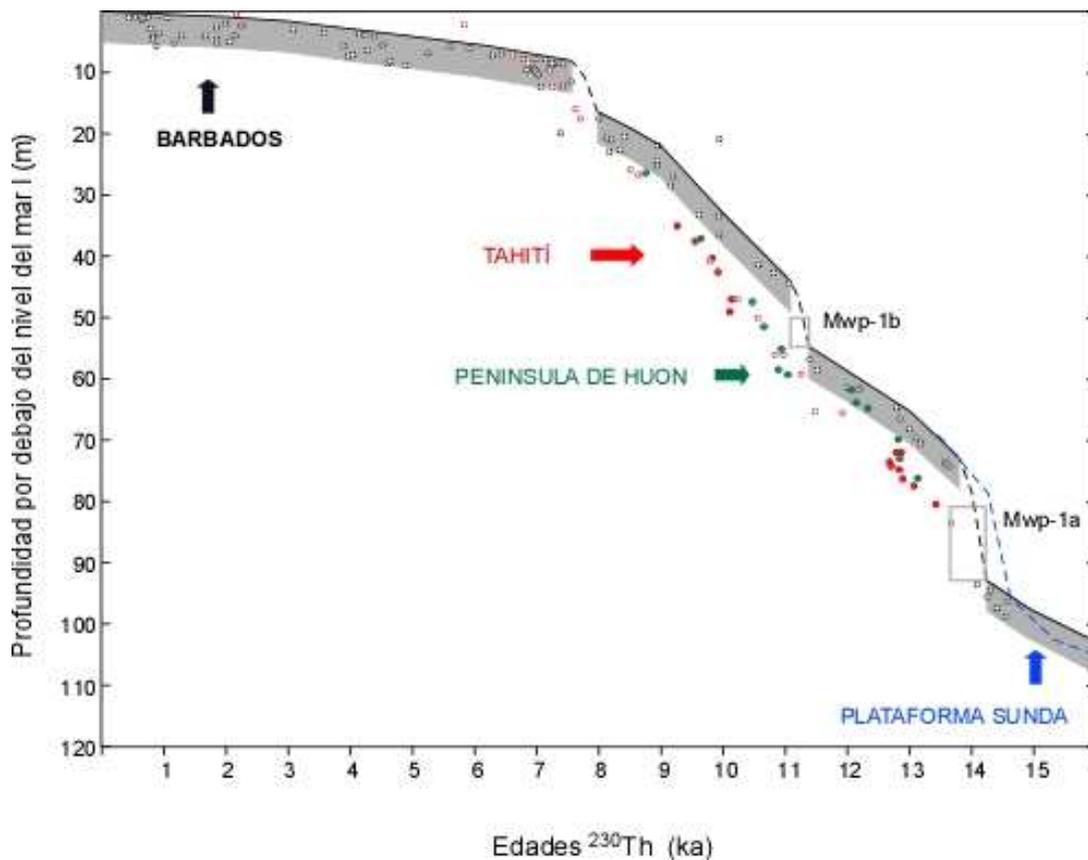


Figura 1. Curva del nivel del mar construida con base en los datos de Barbados (círculos negros), de Tahití (círculos rojos, de la península de Huon (círculos verdes) y de la plataforma Sunda (línea azul punteada). En rectángulos grises se indican los Mwp 1a y 1b. Modificado de Blanchon, 2011.

Poco tiempo después, el Mwp-1b es rechazado tanto por Edwards *et al.*, (1993), con la perforación de los arrecifes elevados en la Península de Huon, Papúa Nueva Guinea, como por Bard *et al.*, (1996) con los núcleos (P6 y P7, ver más adelante) perforados en el puerto de Papeete, Tahití.

En el Caribe Mexicano, Blanchon y Shaw (1995) analizaron afloramientos de arrecifes fósiles e identificaron dos eventos catastróficos de elevación en el nivel del mar, a los que nombraron CRE's (catastrophic rise event, por sus siglas en ingles). El evento CRE-1 de 14.2 a 13.9 ka con una magnitud de 13.5 (± 2.5) m, corresponde al Mwp-1a; y el CRE-2, que inicio a los 11.5 (± 0.1) ka con una magnitud de 7.5 (± 2.5) m, corresponde al Mwp-1b.

Posteriormente, Liu y Millman (2004) re-analizaron los datos de Barbados obtenidos por Fairbanks (1989) y mediante cálculos matemáticos propusieron que el Mwp-1a ocurrió de 14.3 a

14 ka con 20+3 m de aumento en el n.m. y una acreción de 65+10 mm/año, y el Mwp-1b de los 11.5 a 11.2 ka con 13 m de elevación en el n.m. y una acreción de 40 mm/año.

Estudios realizados en Tahití, (mediante los núcleos P8, P9 y P10, ver más adelante) reportaron un crecimiento arrecifal continuo durante los últimos 13 ka, y rechazaron la existencia de los dos Mwp (Cabioch *et al.*, 1999 y Bard *et al.*, 2010).

Los últimos núcleos analizados a la fecha se obtuvieron durante la expedición 310 en Tahití, 37 pozos que abarcan un registro coralino desde los 16 ka a los 8 ka AP (Camoin *et al.*, 2007a). Estos núcleos han sido estudiados por varios investigadores, entre ellos se encuentra Abbey y colaboradores. (2011), que concluyeron que las variaciones en el ensamble arrecifal fueron influenciadas por la calidad del agua y no única y directamente debido al Mwp-1a, identificándolo como sobre-estimado y rechaza el Mwp-1b. Posteriormente Deschamps y colaboradores (2012) sugirieron que el Mwp-1a posiblemente fue tan reciente como 14.65 ka y finalizó antes de 14.31 ka, es decir fue contemporáneo al periodo cálido del Bölling Allerod. Tanto Deschamps *et al.*, (2012) como Camoin *et al.*, (2012) concluyen que aunque el arrecifal postglacial muestra cambios en su composición, su desarrollo fue continuo, sin registrar pausas (hiatos) en el depósito.

1.1.2 PROBLEMÁTICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS QUE INFLUENCIARON EL DESARROLLO ARRECIFAL.

Aunque se ha intentado establecer una curva general del nivel del mar, aún no se ha logrado un acuerdo con respecto al tiempo y a la magnitud de los Mwp, ya que los datos reportados no son coincidentes o se encuentran incompletos. Adicionalmente las únicas curvas correctamente datadas son las de Barbados, Nueva Guinea y Tahití, pero se debe considerar que los análisis provenientes de zonas tectónicamente no estables tienen mayor incertidumbre, como lo son las zonas de subducción de Barbados y Nueva Guinea, que tienen movimientos tectónicos discontinuos.

Tahití, en cambio, es una región tectónicamente estable y distante de la formación de las capas de hielo, por lo que se encuentra mínimamente afectada por el rebote isostático con relación en cambios de la carga de hielo sobre la litosfera (Camoin *et al.*, 2007). En comparación con las

zonas del arco insular (Barbados), los estudios realizados en áreas de subsidencia, como Tahití, tienen la ventaja de ser continuas, expandidas y que han permanecido bajo el agua (Cabioch, 1999).

Sin embargo, una de las limitantes de Tahití, es que no existen especies de coral que sirvan como indicadores del nivel del mar, como es el caso de *Acropora palmata* en los arrecifes del Caribe (Blanchon 2009). Adicionalmente, no se han realizado análisis integrales que tomen en cuenta el aspecto biológico, sedimentológico, topográfico y geográfico para establecer el tiempo y la amplitud de los eventos que influenciaron el desarrollo arrecifal postglacial.

Con base en lo anterior, en el presente estudio se hace un re-evaluación de los núcleos del IODP-310 con el propósito de mejorar las descripciones de los elementos que conformaron el arrecife y de los eventos que influenciaron su desarrollo, a fin de obtener una mejor delimitación de la curva del nivel del mar.

1.2 HIPÓTESIS

Las biofacies y análisis integrales (biológicos, sedimentológicos, geomorfológicos y geográficos) proporcionarán datos de mayor precisión, que los obtenidos con sólo ensambles coralinos.

Un modelo de zonación arrecifal, la correlación entre núcleos y una geocronología, permitirán identificar las variaciones en el nivel del mar, que influenciaron el desarrollo arrecifal postglacial.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo general:

Entender el desarrollo arrecifal postglacial y su respuesta a las variaciones rápidas del nivel del mar.

Objetivos específicos:

- Identificar facies sedimentarias y tafonómicas.
- Llevar a cabo una correlación entre los núcleos con base en las facies que los conforman, su geometría y sus elevaciones.
- Establecer un modelo de zonación para la parte sur de Tahití.
- Desarrollar una cronoestratigrafía detallada y reconstruir la historia del desarrollo arrecifal.
- Identificar variaciones en el nivel del mar que hayan provocado cambios en los ensambles coralinos o ahogamiento arrecifal.
- Reportar una comparación de los resultados obtenidos y trabajos previos.

1.4 MARCO GEOLÓGICO

1.4.1 UBICACIÓN Y GEOGRAFÍA

Tahití (17° 50' S y 149° 20' O) pertenece al Archipiélago de la Sociedad en el centro-sur del Océano Pacífico. Se ubica en el extremo sureste de la alineación y tiene una altitud de 2241 m sobre el nivel del mar (Marshall, 1914) (Fig. 2a). Tahití y Moorea son de las islas más jóvenes inactivas, lo cual es consistente con el movimiento noroeste de la placa Pacífica, sobre el punto caliente durante los últimos millones de años (Ma). La zona en donde se encuentra el punto caliente activo, se ubica a unos 50 km hacia el sureste en Mehetia (Jaupart, 2006) (Fig. 2b). La isla se compone de dos volcanes tipo escudo: Tahití-Nui y Tahití, construidos a lo largo de 2 Ma (Hildenbrand *et al.*, 2008), los cuales estuvieron activos de 1.367 ± 0.016 a 0.187 ± 0.003 Ma (Cabiocch *et al.*, 1999) (Fig. 2c).

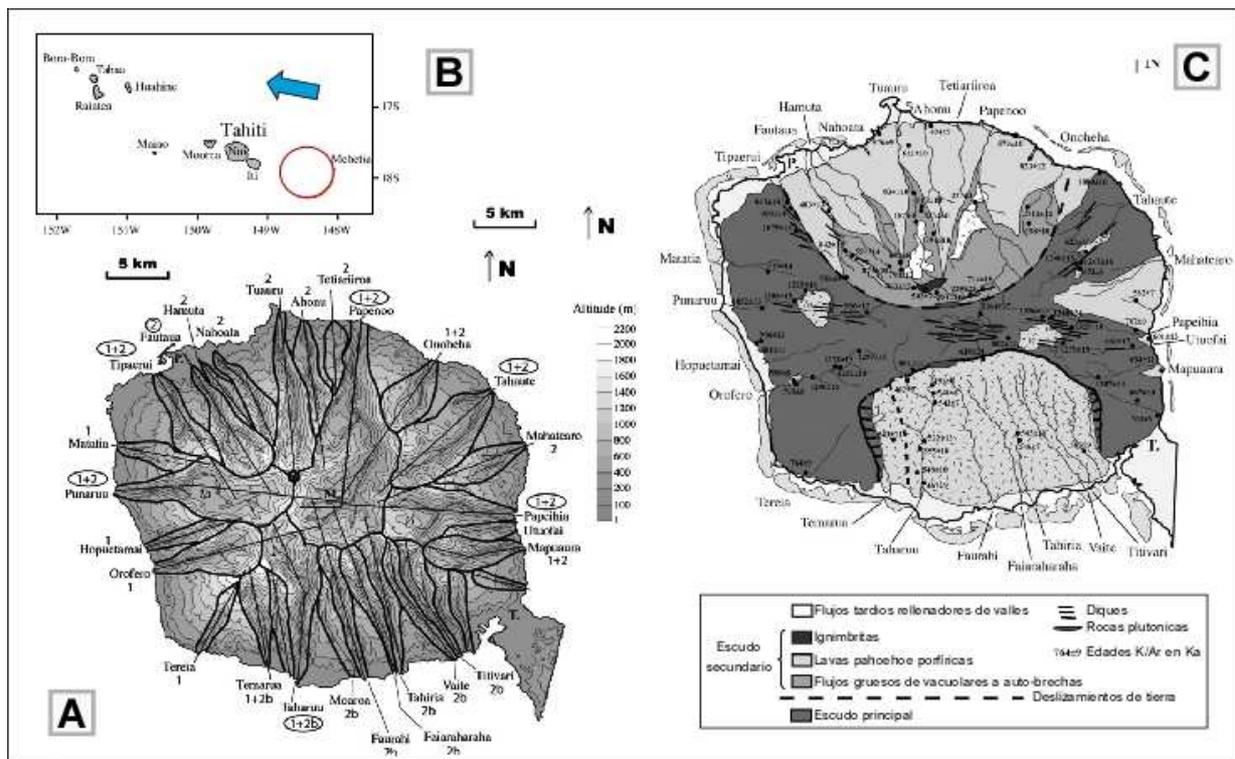


Figura 2. a) Mapa topográfico de Tahití, la altitud se da en escala de grises y las líneas gruesas delimitan las cuencas de drenaje; b) Ubicación de Tahití en el Archipiélago de la Sociedad. El círculo en rojo indica la ubicación actual del punto caliente y la flecha azul el desplazamiento de la Placa del Pacífico; c) Mapa geológico que muestra las principales unidades vulcano-estructurales, la línea negra gruesa continua delimita la línea de costa. Modificado de Hildenbrand y Gillot (2008).

1.4.2 GEOLOGÍA

En Tahití la lavas son basálticas alcalinas o toleíticas. La cubierta sedimentaria comprende una zona de transición que contiene rocas vulcanoclásticas, derivadas de la intemperización del volcán, y rocas carbonatadas, derivadas del depósito de corales y algas durante la subsidencia de la isla o el cambio en el nivel del mar. Los arrecifes de coral, desarrollados a lo largo de la orilla del volcán, contienen esencialmente calizas porosas y permeables, algunas veces dolomitizadas (Rougerie, 1997).

Las tasas de subsidencia reportadas para Tahití varían según diferentes autores. Le Roy (1994) reportó una tasa de 0.15 mm/año, Bard y colaboradores (1996) estimaron un intervalo de 0.15 mm/año a 0.25 mm/año, con base en las edades de lavas subaéreas debajo de la secuencia de los arrecifes del Pleistoceno, Montaggioni y colaboradores (1988) calcularon un valor de 0.4 mm/año. Los estudios más recientes la calculan en 0.55 mm/año utilizando datos geocronológicos (Thomas *et al.*, 2009) y datos geodésicos (Fadil *et al.*, 2011).

1.4.3 OCÉANOS Y CLIMA

La Polinesia se encuentra bajo la influencia de la Oscilación del Sur, un proceso climático que comprende la interacción entre los sistemas de alta presión (centrados en el área de la Isla de Tahití - Isla Este) y el sistema de baja presión (centrado en el área Ecuatorial norte Australiana-Indonesia). El desbalance en la presión entre estos dos sistemas produce los Vientos Alisios, estos vientos tienen un rango de 10 a 20 km/hr y soplan principalmente del sector norte en el verano austral y del sector sur en invierno.

Los vientos alisios convergen en el noreste y en el sureste de la Polinesia creando una zona de estancamiento y altas precipitaciones: la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (SPCZ)

por sus siglas en inglés). Se tienen cambios estacionales en la localización del “SPCZ”, que son la principal causa de la presencia de las estaciones lluviosas en el Pacífico Sur tropical.

El clima en Tahití es típicamente tropical, con 2 estaciones: una estación cálida y lluviosa, de noviembre a abril (verano austral), con una temperatura máxima en la superficie del mar de entre 28° -29° C, y una estación fría de mayo a octubre (invierno austral), con temperaturas entre 24° -25°C (Cabiocch, 1999).

La precipitación pluvial promedio en la provincia de Tahití es 150 cm/año (Rougerie, 1997), presentándose los valores mínimos (menores a 50 mm) en invierno y los valores máximos (superiores a los 400 mm) en los meses de Enero y Febrero. Los valores de salinidad son generalmente constantes a lo largo del año y cercanos a los 36 ups (Cabiocch, 1999).

Los vientos alisios del sureste y del noreste determinan el régimen hidrológico y generan olas de más de 2 m de amplitud a lo largo del eje mayor de la isla. Las mareas son semi-diurnas y con amplitudes promedio de 0.5 m. Las plataformas arrecifales emergen durante la marea baja en primavera y las olas comúnmente rompen en el área central de la plataforma del arrecife, durante la marea alta (Cabiocch, 1999). La zona de mayor energía es la costa al sur de Tahití, que se encuentra directamente impactada por fuertes oleajes provenientes de la Antártica, como se puede observar en la figura 3.

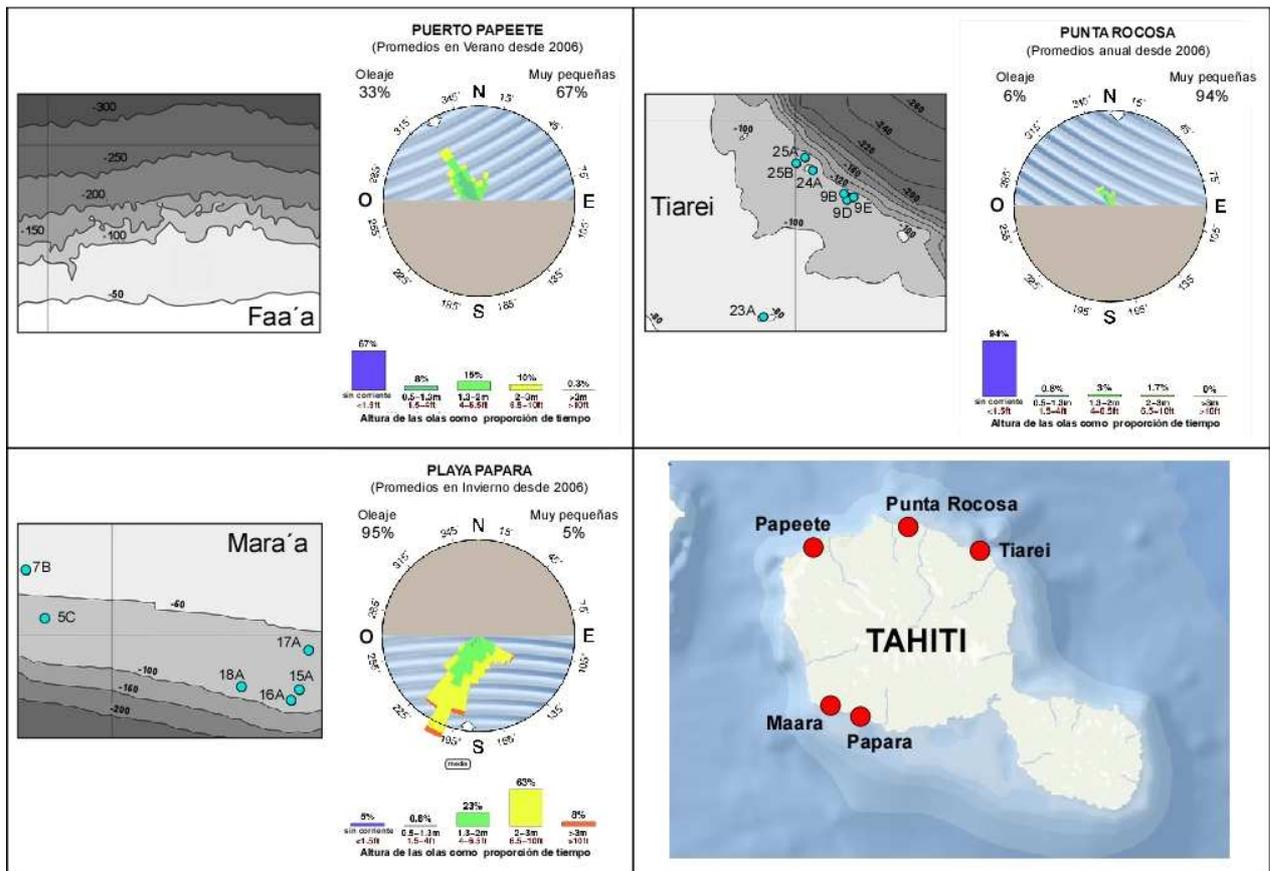


Figura 3. Batimetría de Papeete, Fa'a y Maraa'a, y promedios anuales de corrientes para Papeete, Punta Rocosa (cercana a Tiarei) y Papara (cercana a Maraa'a). Se muestran las estaciones del año con los valores más altos de corrientes. Datos de <http://es.surf-forecast.com/>

Los huracanes y tormentas tropicales, afectan el suroeste del Pacífico esporádicamente, con un promedio de cuatro a ocho ciclones cada cien años (Laurent *et al.*, 2004). Los huracanes que afectan Tahití provienen del noreste y del noroeste y ocurren durante los meses de noviembre a abril (Cabioc, 1999).

1.4.4 ARRECIFES

La Polinesia Francesa presenta en su lado de barlovento un arrecife bordeante separado de la costa por una laguna profunda, en la que se forman parches arrecifales. La plataforma arrecifal alcanza un ancho máximo de 1.5 km, es discontinua y está interrumpida por aberturas o bocanas de menos de 100 m que se formaron por procesos aluviales (Chavalier, 1973). La plataforma arrecifal tiene una cresta de algas calcáreas coralináceas bien desarrollada, cuyo ancho es aproximadamente de 30 a 40 m y que emerge más de 40 cm durante la marea baja (Harmelin Vivien, 1985).

En Tahití, el arrecife es relativamente plano y estrecho, alcanzando un ancho máximo de aproximadamente 130 m. Éste consiste de franjas y barreras arrecifales discontinuas y la pendiente arrecifal externa está conformada por valles y crestas, con una pendiente hacia el mar de 20°. El arrecife bordeante a lo largo de la costa sur y oeste, es amplio y está separado de la barrera arrecifal por una laguna somera. En las costas norte y este, el arrecife bordeante es mucho más estrecho y está separado de la costa por una laguna que alcanza profundidades de hasta 35 m (Cabioch *et al.*, 1999).

La morfología general en Tahití (Fig. 4) fue definida a partir de observaciones en campo (Salvat *et al.*, 1985), datos batimétricos y perfiles sísmicos (Camoin *et al.*, 2003; Camoin *et al.*, 2006). Camoin y colaboradores (2006) describen dos terrazas principales, localizadas entre los 50-60 m y 90-100 m de profundidad respectivamente, y una tercer terraza más estrecha, a 75-80 m de profundidad, desarrollada durante el aumento del mar durante la última deglaciación. La zona sur de Tahití (Mara'a) se caracteriza por tener una pendiente relativamente menos abrupta, que va de los 45 a los 97 metros de profundidad, que la zona norte (Thiarei), (Camoin *et al.*, 2003, 2006) (Fig. 3). Dado que Mara'a se caracteriza por presentar una alta energía del oleaje, no se cuenta con mayor información respecto a su morfología y zonación arrecifal.

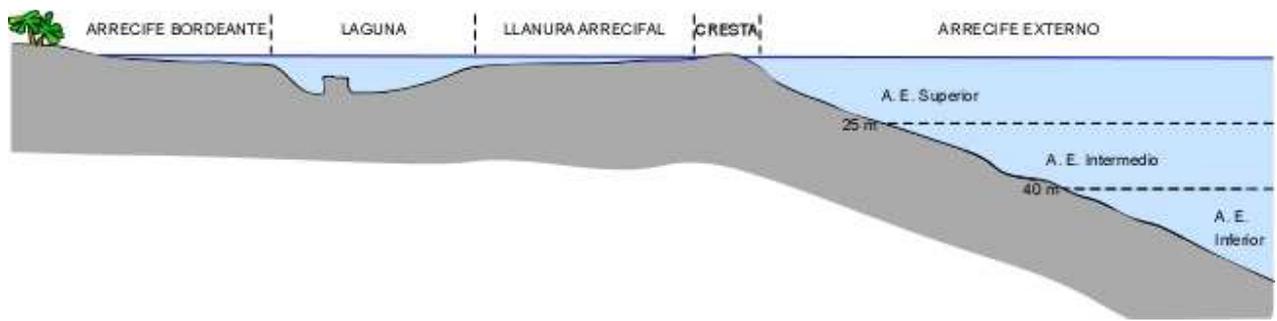


Figura 4. Sección transversal de las zonas en los arrecifes de Tahití. Modificado de Gabrie y Salvat (1985).

CAPÍTULO 2. UBICACIÓN Y MÉTODOS

2.1 UBICACIÓN

Se decidió trabajar con los pozos ubicados en la parte Sur de Tahití, en Mara´a (Fig. 5a), ya que cuenta con la secuencia de núcleos de mayor longitud (486.2 m) y con un alto porcentaje (58.3 %) de recuperación de entre los sitios perforados por el IODP Expedición 310 (Fig. 5b).

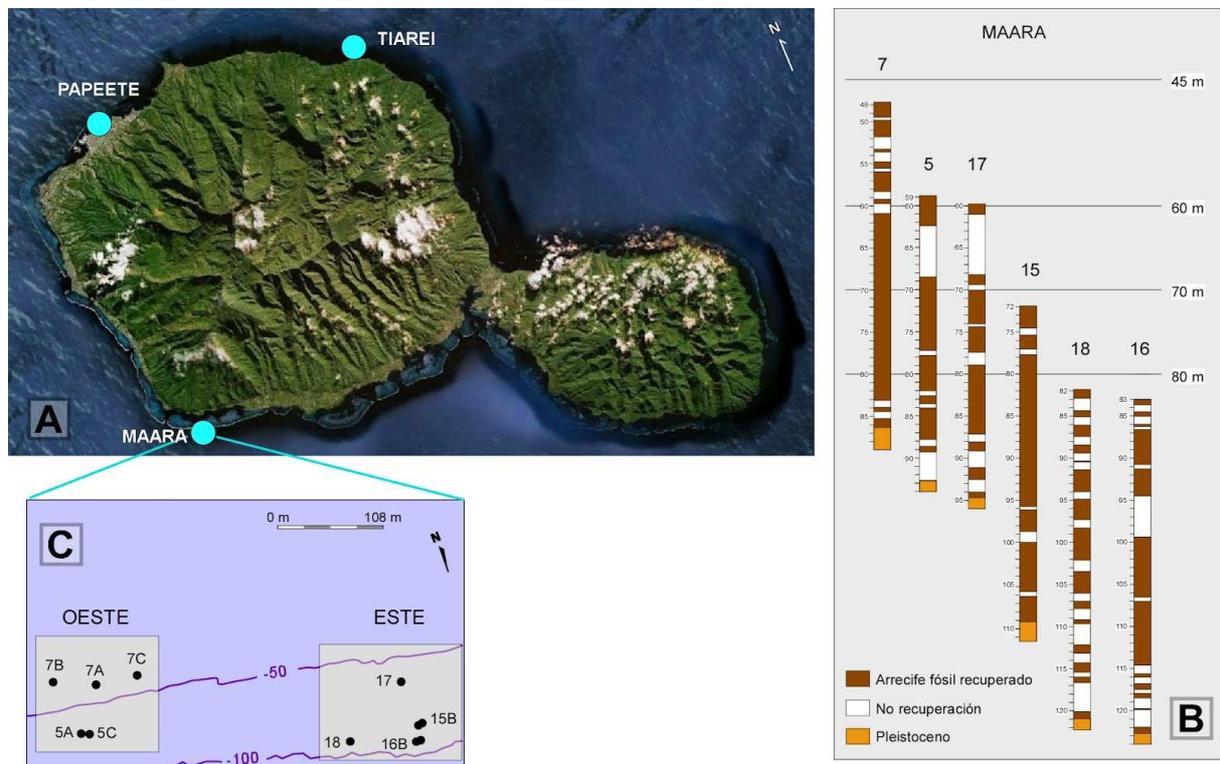


Figura 5. A) Ubicación de Mara´a en la parte sur de Tahití. B) Sitios perforados en orden de menor a mayor profundidad, en café el material recuperado, en blanco el no recuperado y en amarillo el basamento Pleistocénico. C) Mapa batimétrico con las agrupaciones Este y Oeste de los sitios perforados.

Adicionalmente, la ubicación de Mara´a en la zona de barlovento favorece el objetivo de éste estudio, ya que los arrecifes de alta energía son mejores para la reconstrucción de curvas de nivel del mar que los de media o baja energía, debido a que el ámbito de los ensambles coralinos se encuentran mejor definidos (Cabiocch 2003).

Camoin y colaboradores (2007) numeraron los pozos conforme fueron perforados, pero en el presente trabajo se ordenaron de menor a mayor profundidad (Fig. 5b), para obtener una mejor visualización de sus características. Por lo anterior de aquí en adelante los sitios serán mencionados con el siguiente orden: 7,5,15,17,18 y 16.

Los pozos perforados en Mara'a se subdividen en la parte Oeste y Este, como se observa en la figura 5c, la agregación de núcleos en el Oeste corresponde a los sitios 7 (A, B y C) y 5 (A, B, C y D), y los del lado Este corresponde a los sitios 17, 15 (A y B), 16 (A y B) y 18.

De acuerdo con la coordenadas proporcionadas por Camoin *et al.*, (2007), en la zona Oeste, la distancia entre los pozos 5A y 7A fue de 67.8 m. La distancia entre los pozos 5A y 5C fue de 9.5 m y entre los pozos 7A-7B y 7B-7C de 51 m. La profundidad de la columna de agua se reportó entre 41.65 y 59.63 m. En la zona Este, la distancia entre los pozos 15A y 16A fue de 21 m, entre los pozos 15A y 17 de 60.5 m y entre los pozos 16A y 18 de 73.5 m. La distancia entre los pozos 15A y 15B fue de 7 m y entre 16A y 16B de 5 m. La profundidad de la columna de agua se reportó entre 56.45 hasta 81.8 m. La distancia del pozo 7C y del 17 a la línea de cresta fue de 350 m y la distancia entre el pozo 5C y el sitio 18 fue de 285 m (Fig. 6).

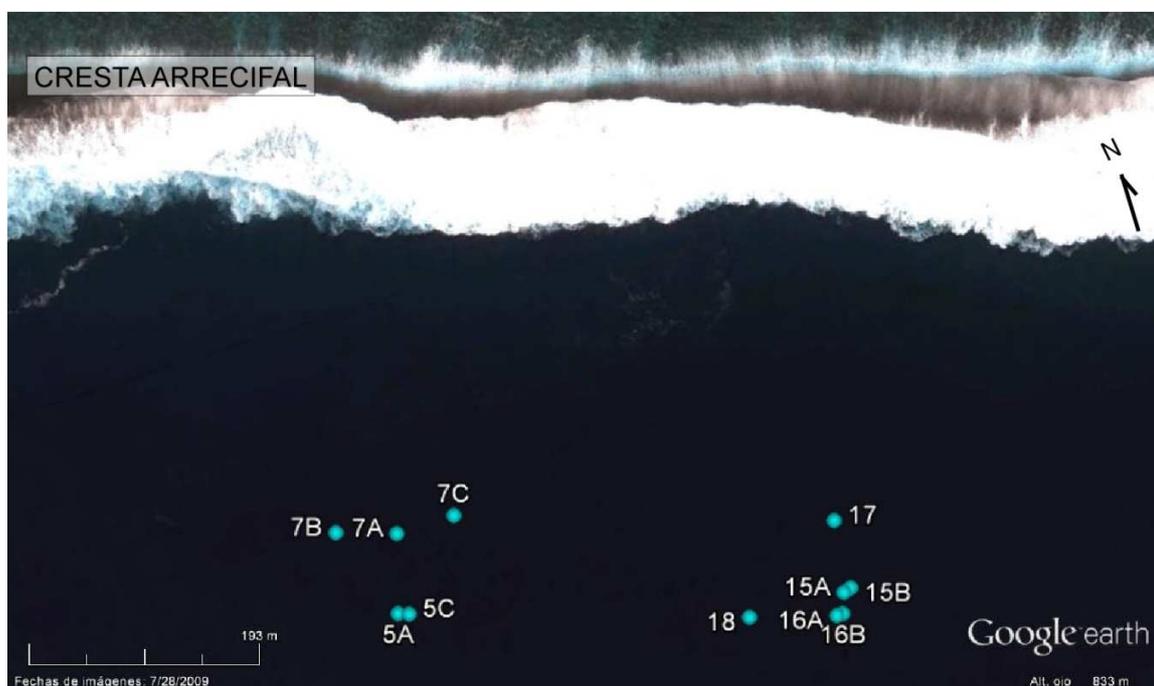


Figura 6. Ubicación de los pozos perforados con respecto a la cresta arrecifal actual.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 OBTENCIÓN DE NÚCLEOS

Los núcleos fueron obtenidos por medio del programa *Integrated Ocean Drilling Program* (IODP), durante la expedición 310 (Camoin *et al.*, 2007). Debido a las profundidades del tirante de agua, la perforación requirió el uso de una plataforma especial y de una plantilla de perforación y reentrada, que permitiera perforar el fondo marino con mayor estabilidad (Camoin *et al.*, 2007). El tubo conductor, para todas las operaciones, fue la sarta de perforación del *American Petroleum Institute* y se utilizó una barrena estándar HQ3 de 3 m de largo, impregnada con fragmentos de diamantes naturales y sintéticos, para permitir la extracción óptima de muestras en cualquier formación, adquiriendo núcleos de 60 mm de diámetro. Se redujo el rango de longitud máximo de recuperación de 3 m a 1.5 m, para asegurar una alta recuperación en el entorno de los arrecifes (Camoin *et al.*, 2007).

Durante la perforación del pozo 15B se utilizaron tubos recuperadores metálicos, en lugar de los de plástico, ya que éstos últimos causaron obstrucción en la perforación. Todos los núcleos anteriores al 15B tuvieron menor recuperación, debido a la deformación del tubo de plástico que resultó en el bloqueo de la sección perforada. Los núcleos 7A-C, 5A-C y 15A fueron recolectados en tubos HQ3 de plástico, por lo que presentan porcentajes de recuperación variables (33-75%) y mayor fracturación. Los tubos de plástico fueron reemplazados por metálicos en los pozos 15B, 16A-B, 17A y 18A y por lo tanto presentan una mejor recuperación (52-72%), menor fracturamiento y mejora en las tasas de penetración (Inwood *et al.*, 2008). En general el tubo de perforación avanzó en incrementos de 1.5 m y la profundidad del núcleo fue medida con ± 0.1 m de precisión (Inwood *et al.*, 2008).

Para ciertos puntos, se tienen registros geofísicos de sondeo, que proporcionaron información continua sobre las propiedades físicas, químicas, texturales y estructurales de las formaciones geológicas, los cuales se utilizaron para corroborar la caracterización de las secciones. Éstos registros de pozo fueron realizados por el Consorcio de Petrofísica Europea (Camoin *et al.*, 2007).

2.2.2 IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN

En el transcurso de la expedición 310, los núcleos fueron cortados y digitalizados mediante un escáner de cama plana, con el sistema de imágenes digitales Geotek X-Y (Geoscan II), que cuenta con una resolución de barrido de 200 ppcm y de 130 ppcm de imagen cruzada. Dichas imágenes se encuentran disponibles en el sitio web del IODP en resolución media y fueron utilizadas en la primer etapa de identificación de facies, previa a la descripción de los núcleos en la Universidad de Texas A&M.

En el Repositorio del IODP, en Texas, se escanearon nuevamente los núcleos, con la finalidad de acceder a ellos posteriormente y ampliar la información recabada. La obtención de las imágenes fue por medio de un escáner de alta resolución (20 líneas por milímetro), construido por el personal del repositorio en el IODP.

2.2.3 FECHAMIENTOS

Se utilizaron fechamientos de trabajos previos. Heindel *et al.*, (2009), Inoue *et al.*, (2010), y Abbey *et al.*, (2011) reportan edades de ^{14}C y Deschamps *et al.*, (2012) edades de $^{230}\text{Th}/\text{U}$ (Tabla 1). Las edades radiocarbono fueron utilizadas solo como referencia, ya que cuentan con un mayor nivel de incertidumbre que las edades $^{230}\text{Th}/\text{U}$ debido a variaciones en el reservorio.

Tabla 1. Referencias: H) Heindel *et al.*, (2009); I) Inoue *et al.*, (2010); A) Abbey *et al.*, (2011); Deschamps *et al.*, (2012). En registro se indica el núcleo y la profundidad de donde se obtuvo la muestra. En muestra se describe el género y morfología del coral fechado, se especifica si la muestra fue un clasto y si el núcleo se encontró en malas condiciones (núcleo perturbado). Edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$. Edades ^{14}C sin calibrar, corrección por reservorio según datos de Paterne *et al.*, (2004), edades calibradas utilizando los datos de Fairbanks *et al.*, (2005) (<http://radiocarbon.LDEO.columbia.edu>). Profundidad del núcleo, a la cual se obtuvo la muestra fechada, corregida por un valor de subsidencia de 0.5 mm/año. Profundidad ambiental de las colonias fechadas, obtenida con base en la curva del nivel del mar.

Referencia	Registro	Muestra	Edad (ka AP)	Edad (años AP)		Edad (ka AP)	Prof. de recolección de la muestra corregida por subsidencia (0.5 mm/año)	Paleoprofundidad (mbnm)
			230 U/Th	14C	Corrección por reservorio	14C calibradas		
D	5A-12R1 w51-54	<i>Porites masivo</i>	11.03 ± 0.02				69.7	25.3
I	5B-3R1 71.3	<i>Porites masivo</i>		9522 ± 44	9122	10.25 ± 35	66.2	31.3
I	5C-8R2 73.8	<i>Porites masivo</i>		9760 ± 46	9360	10.57 ± 57	68.5	30
D	5C-11R1 w46-59	<i>Acropora ramificada robusta</i>	11.86 ± 0.02				74.1	19
D	5D-2R1 w107-115	<i>Pocilopora ramificada robusta</i>	12.43 ± 0.03				78.9	20.3
D	5D-5R2 w0-5	Clastos	13.16 ± 0.04				82.7	17.5
D	5D-6R1 w23-31	<i>Pocillopora (núcleo perturbado)</i>	13.96 ± 0.05				84.1	8.7
D	5D-6R2 w0-5 a	<i>Acropora tabular (núcleo perturbado)</i>	13.74 ± 0.04				84.4	12.3
I	7A-18R1 59.9	<i>Porites masivo</i>		9214 ± 89	8814	9.86 ± 188	55.0	24.4
I	7A-18R1 60.3	<i>Porites masivo</i>		9062 ± 65	8662	9.6 ± 75	55.5	27.7
D	7A-18R1 w77-109	<i>Porites masivo</i>	10.03 ± 0.02				56.6	24
H	7A-32R1 w29-33	<i>Acropora tabular</i>		10870 ± 50	10590	12.55 ± 57	75.3	16
H	7B-11R1 w54-60	<i>Agaricia</i>		8690 ± 50	8290	9.29 ± 86	51.8	27.1
I	7B-21R1 67.1	<i>Porites masivo</i>		9917 ± 48	9517	10.8 ± 121	61.7	20.4
D	7B-21R1 w0-20	<i>Porites masivo</i>	11.06 ± 0.04				61.6	17
A	15A-2RCC_12-14	<i>Pavona</i>		8640 ± 70	8240	9.21 ± 114	69.7	45.8
D	15A-33R1 w29-40	<i>Pocilopora ramificada intermedia</i>	13.56 ± 0.03				97.0	27.3
D	15A-36R1 w51-52	<i>Acropora tabular</i>	14.42 ± 0.03				100.5	12
D	15A-36R2 w0-6	<i>Acropora tabular</i>	14.52 ± 0.02				100.5	7.3
D	15A-37R1 w19-28	<i>Acropora tabular</i>	14.65 ± 0.02				101.5	6
A	15B-37R1_57-63	<i>Porites masivo</i>		12470 ± 80	12070	13.87 ± 81	100.2	26.7
D	16A-36R2 w5-10	<i>Porites masivo (núcleo perturbado)</i>	14.56 ± 0.02				111.1	16.3
A	16B-23R1_65-70	<i>Porites masivo</i>		13210 ± 90	12930	15.06 ± 138	115.1	17
A	17A-4R1_1-3	<i>Pavona encostrante hojas</i>		5565 ± 50	5165	5.92 ± 46	57.7	55.8
A	18A-1R1_16-22	<i>Pavona encostrante tabular</i>		8350 ± 60	7950	8.8 ± 134	77.6	56.9
D	18A-7R1 w73-82	<i>Acropora tabular en copa</i>	11.49 ± 0.03				86.4	34.1
D	18A-18R1 w40-50	<i>Porites masivo</i>	14.27 ± 0.06				105.4	23.3
D	18A-19R1 w107-110	<i>Porites masivo</i>	14.34 ± 0.03				108.0	24
A	18A-21R1_30-33	Clastos		12730 ± 80	12330	14.16 ± 140	111.5	32

Las edades ^{14}C fueron corregidas por el efecto de reservorio y posteriormente se calibraron a edades calendario (cal), utilizando la curva reportada por Fairbanks y colaboradores en 2005 (<http://radiocarbon.LDEO.columbia.edu>). Debido a que se tiene variación en la edad reservorio, se utilizaron edades aparejadas de ^{14}C y $^{230}\text{Th}/\text{U}$, reportadas por Paterne *et al.*, (2004). Este cálculo se deriva de la diferencia entre las edades ^{14}C calibradas, utilizando los datos de Fairbanks *et al.*, (2005) (<http://radiocarbon.LDEO.columbia.edu>) y sus respectivas edades absolutas de $^{230}\text{Th}/\text{U}$.

Paterne y colaboradores (2004) reportaron que los corales desarrollados durante el último período Glacial (>14.5 ka) y el *Younger Dryas* (11.6 a 12.9 ka), tienen un valor de reservorio significativamente menor de 280 años, en contraste con los del Bölling Allerod y el Holoceno que tienen valores de 400 años o más. Debido a lo anterior, se corrigieron las edades ^{14}C con base en éstos dos reservorios (Tabla 1).

En cuando a los análisis de $^{230}\text{U}/\text{Th}$, la mayoría fueron realizados con un espectrómetro de masas de termo-ionización VG-54 y el cálculo de las edades fue mediante el software *Isoplot*. No realizaron correcciones por ^{230}Th detrítico, debido a que las concentraciones de ^{232}Th en la mayoría de los casos fue baja (≤ 0.5 ppb) (Deschamps *et al.*, 2012).

2.2.4 DESCRIPCIÓN DE NÚCLEOS

En la primera etapa de descripción de los núcleos se analizaron imágenes de resolución media, en las cuales se identificaron características que pudieron ser observadas desde un aspecto bidimensional (2D), como lo son el grado de litificación y recuperación, los corales principales, la coloración y los posibles contactos entre facies desde un aspecto general. Posteriormente en el Repositorio de Texas A&M, se observaron directamente los núcleos desde un aspecto tridimensional (3D) y se describieron con base en el Protocolo (Tabla 2).

En el Protocolo se establecen las características a describir y los parámetros para la medición de cada una de ellas. Tiene como base la descripción del ensamble arrecifal, elementos coralinos, elementos detríticos y facies.

Tabla 2. Protocolo para descripción de núcleos.

PROTÓCOLO PARA DESCRIPCIÓN DE NÚCLEOS																																														
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Ensamble arrecifal</div> <p>Indicadores de corales "is"</p> <ul style="list-style-type: none"> - Superficie basal encostrante. - Orientación del coral. - Capa de cCA gruesa en la base del coral - Geopetales mayores a 0.3 cm ¹ con sedimentos litificados en su interior. - Mostrando orientación consistente. - Orientación relativa del coral. - Proximidad mutua entre colonias. - Contexto en relación a los elementos que los rodean. <p>Biofabrica ²</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Compacta Ensamble arrecifal soportado por las colonias que se encuentran en contacto basal comúnmente visible, los corales dominan la roca y la biolita es un componente menor. ■ Agregada Ensamble arrecifal semi soportado por colonias con puntos de contacto en común, pero líneas de contacto basal raramente visibles. ■ Dispersa Ensamble arrecifal escasamente soportado por la colonia con puntos de contactos raramente encontrados, la biolita conforma el mayor componente de la roca. <p>Uniformidad ³</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Monomorficas Biofábrica dominada por un solo tipo de forma. ■ Bimorficas Biofábrica dominada por dos tipos de formas. ■ Multimorficas Biofábrica dominada por >2 tipos de formas. 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Elementos coralinos</div> <p>Género ⁴</p> <p>Morfología ⁵</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ramificados <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>Largos</td><td>>10cm long.</td></tr> <tr><td>Cortos</td><td><10cm long.</td></tr> <tr><td>Delgados</td><td><1cm diámetro</td></tr> <tr><td>Intermedios</td><td>1-2cm diámetro</td></tr> <tr><td>Robustos</td><td>>2cm diámetro</td></tr> </table> ■ Massivos <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>Pequeños</td><td><25 cm</td></tr> <tr><td>Medianos</td><td>25 to 50 cm</td></tr> </table> ■ Placas <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>Delgadas</td><td>> 1cm</td></tr> <tr><td>Gruesas</td><td>> 5 cm</td></tr> </table> ■ Hojas < 1cm <p>Condición fósil</p> <p style="text-align: center;">Bioerosión ⁶</p> <table style="width: 100%;"> <tr><td>Ligera</td><td style="text-align: right;">* Orificios pequeños</td></tr> <tr><td>0% - 5% *</td><td style="text-align: right;">**Orificios grandes</td></tr> <tr><td>20% 30% **</td><td></td></tr> <tr><td>Moderada</td><td></td></tr> <tr><td>10% - 30% *</td><td></td></tr> <tr><td>40% - 50% **</td><td></td></tr> <tr><td>Fuerte</td><td></td></tr> <tr><td>40% - 50% *</td><td></td></tr> <tr><td>60% - 70% **</td><td></td></tr> </table> <p style="text-align: center;">Bioerosionadores</p> <p>Entobia Gastrochaenolites Vermétidos</p> <p style="text-align: center;">Encrustación ⁵</p> <table style="width: 100%;"> <tr><td>Ligera</td><td>> 0.5 cm</td></tr> <tr><td>Moderada</td><td>0.5 - 1.5 cm</td></tr> <tr><td>Fuerte</td><td>1.5 mm - 3 cm</td></tr> <tr><td>Extrema</td><td>< 3cm</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">Biolita</p> <p>Presencia o ausencia Potente > 3 cm</p>	Largos	>10cm long.	Cortos	<10cm long.	Delgados	<1cm diámetro	Intermedios	1-2cm diámetro	Robustos	>2cm diámetro	Pequeños	<25 cm	Medianos	25 to 50 cm	Delgadas	> 1cm	Gruesas	> 5 cm	Ligera	* Orificios pequeños	0% - 5% *	**Orificios grandes	20% 30% **		Moderada		10% - 30% *		40% - 50% **		Fuerte		40% - 50% *		60% - 70% **		Ligera	> 0.5 cm	Moderada	0.5 - 1.5 cm	Fuerte	1.5 mm - 3 cm	Extrema	< 3cm	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Elementos detríticos</div> <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño ⁷ - Composición - Distribución - Matriz <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">Facies</div> <p>Clasificación textural ⁸</p> <ul style="list-style-type: none"> - Calcilodolita - Caliza lodosa - Caliza lodogranular - Caliza granular - <i>Framestone</i> <p style="text-align: center;">Contactos</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Directo Cambio en la litología o facies: horizontal, inclinado, irregular. ■ Erosivo Evidencia de truncación en granos o esqueletos. ■ Transicional Cambio gradual entre facies, puede ser abrupto ocurriendo dentro de pocos centímetros o más. <hr style="width: 50%; margin-left: 0;"/> <p>1. Blanchon y Perry, 2004. 2. Modificado de Ridding, 2002. 3. Modificado de Insalaco, 1998. 4. Veron, 2000. 5. Modificado de Blanchon, 2010. 6. Modificado de Flügel, 1982. 7. Wentwort, 1988. 8. Dunham, 1962.</p>
Largos	>10cm long.																																													
Cortos	<10cm long.																																													
Delgados	<1cm diámetro																																													
Intermedios	1-2cm diámetro																																													
Robustos	>2cm diámetro																																													
Pequeños	<25 cm																																													
Medianos	25 to 50 cm																																													
Delgadas	> 1cm																																													
Gruesas	> 5 cm																																													
Ligera	* Orificios pequeños																																													
0% - 5% *	**Orificios grandes																																													
20% 30% **																																														
Moderada																																														
10% - 30% *																																														
40% - 50% **																																														
Fuerte																																														
40% - 50% *																																														
60% - 70% **																																														
Ligera	> 0.5 cm																																													
Moderada	0.5 - 1.5 cm																																													
Fuerte	1.5 mm - 3 cm																																													
Extrema	< 3cm																																													

Blanchon (1998) menciona que la identificación de corales *in situ* puede ser problemática en núcleos con diámetro estrecho, tal es el caso de los núcleos del IODP-310 que cuentan solamente con un diámetro de 6 cm. La visualización de un coral y sus características, depende del ángulo con el que fue perforado, es decir, del corte cilíndrico alrededor del núcleo (vista 3D) y el corte en sección plana (vista 2D), cuando el núcleo es disectado a lo largo de su eje. Por lo anterior, es necesario identificar qué tipo de proyección muestra la colonia de coral, con el fin de lograr una correcta toma de datos.

En cuanto a la medición de las algas coralinas encostrantes (cCA), ésta fue continua a través de los núcleos y se midió trazando una línea perpendicular de la base del coral, al borde donde finalizaba el alga; preferentemente, donde se observara un corte perpendicular al eje principal de la colonia de coral a medir ó de alguna de sus ramas, en caso de ser un coral ramificado. La descripción de las colonias de coral tiene mayor complicación cuando son pequeñas y desarrollan una biofabrica dispersa, volviéndose aún más complicado cuando fueron sepultadas junto con un flujo abundante de detritos. En ocasiones será igual de complicada la clasificación de corales cuando son demasiado grandes, ya que impide observar la periferia y qué tipo de relación guarda con las colonias de coral adyacentes. Esto ocurre principalmente cuando el diámetro del coral es mucho mayor que el diámetro del núcleo y su biofábrica es dispersa o se tiene pobre/nula recuperación, imposibilitando el análisis del contexto con las colonias de coral próximas.

Debido a las limitaciones de núcleos con diámetro reducido, se deben de tomar en cuenta todas las características mencionadas en la identificación de corales *in situ*, ya que ninguno de los indicadores es totalmente aprobado por sí solo. Al aplicarse el protocolo en su conjunto se logra una visión amplia y congruente de las condiciones bajo las que fue sepultado cada elemento.

Al momento de realizar la descripción, es necesario tener en mente el género, la morfología y la distribución de las colonias, ya sea que formen parte del ensamble arrecifal y construyan una biofabrica o bien que sean parte del aporte detrítico; ésta visualización constante es requisito para la identificación del ambiente de depósito y sus procesos. Ya que el arrecife es un ambiente ampliamente diverso, con múltiples eventos ocurriendo al mismo tiempo, es fácil llegar a confundir sus elementos si no se tiene cuidado de mantener una proyección mental conjunta, que prevenga clasificaciones individuales, las cuales sin duda nos llevaran a una clasificación errónea.

Finalmente los elementos detríticos fueron descritos con la misma importancia que aquellos que se encontraron *in situ*, ya que proporcionan datos trascendentes acerca del depósito, su origen y relación con el ensamble arrecifal, información imprescindible para el desarrollo de la historia arrecifal. Una vez descritas las muestras se identificaron las biofacies y sus tipos de contacto para realizar los gráficos correspondientes de cada sitio. Los puntos mencionados en el Protocolo fueron representados mediante la simbología que se observa en la Figura 7.

GÉNEROS		CONDICION del CORAL		MARCO ARRECIFAL	
<i>Acropora</i>	<i>Pocillopora</i>	cCA	cCA con verméticos	Biofabrica Dispersa	
<i>Porites</i>	<i>Agaricia</i>	Colonias de coral menos frecuentes		Biofabrica Agregada	
		OTROS		Biofabrica Compacta	
		Colonias encostrantes		ELEMENTOS DETRITOS	
		CONTACTOS		Grava con Textura Granular	
		Directo entre Facies		Grava con Textura Lodogranular	
		Transicional		Grava o arena con Terrigenos	
		Inferido		CARAC. de PERFORACION	
		Directo entre SubFacies		Nula recuperación	
		Transicional		Núcleo perturbado	
		Inferido		BASAMENTO	
		DATACIONES		U/Th	Pleistoceno
		Calibradas			

RAMIFICADOS		PLACAS	
Delgados largos	Delgada	Gruesa	Placa en forma de Copa
Delgados cortos	HOJAS		
Intermedios largos	Sencilla		
Intermedios cortos	MASIVOS		
Robustos largos	Pequeños		
Robustos cortos	Medianos		

Figura 7. Simbología utilizada en la descripción de núcleos con base en el Protocolo.

CAPITULO 3. RESULTADOS

3.1 IDENTIFICACIÓN DE FACIES

Se identificaron facies en cada pozo con base al protocolo. Posteriormente, los núcleos cercanos o que fueron perforados en profundidades similares, se combinaron para elaborar un resumen que fuera representativo de cada sitio. Se le llama “resumen” al gráfico que resulta de la inclusión de todos los datos provenientes de los pozos que componen un sitio. Estos resúmenes son más completos que los pozos individuales ya que, en la mayoría de los casos, los intervalos faltantes en un núcleo se encontraban presentes en el pozo contiguo.

A continuación se muestran los resúmenes de los sitios 7 (Fig. 8), 5 (Fig. 9), 17 (Fig. 10), 15 (Fig. 11), 18 (Fig. 12) y 16 (Fig. 13).

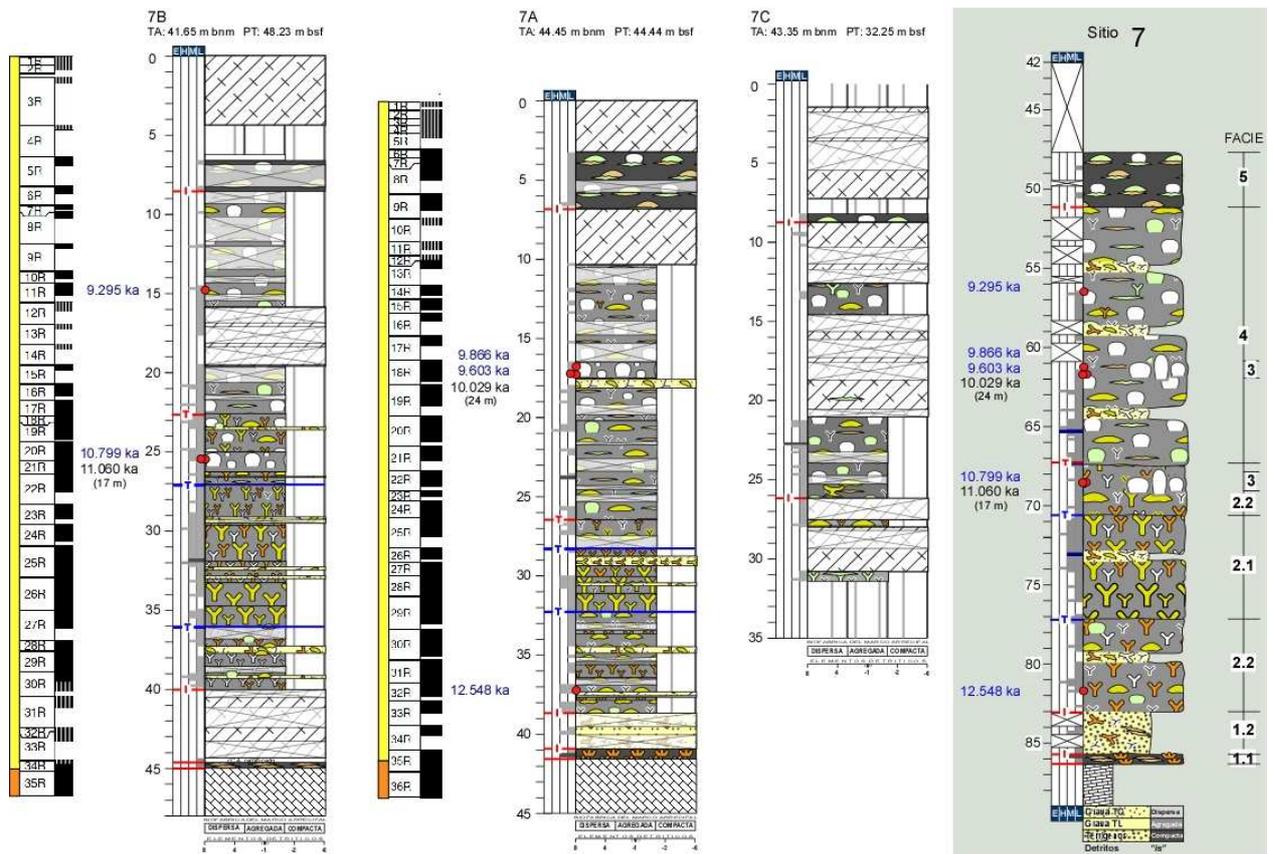


Figura 8. Resumen de sitio 7, conformado por los pozos 7A, 7B y 7C. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección

fecha, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

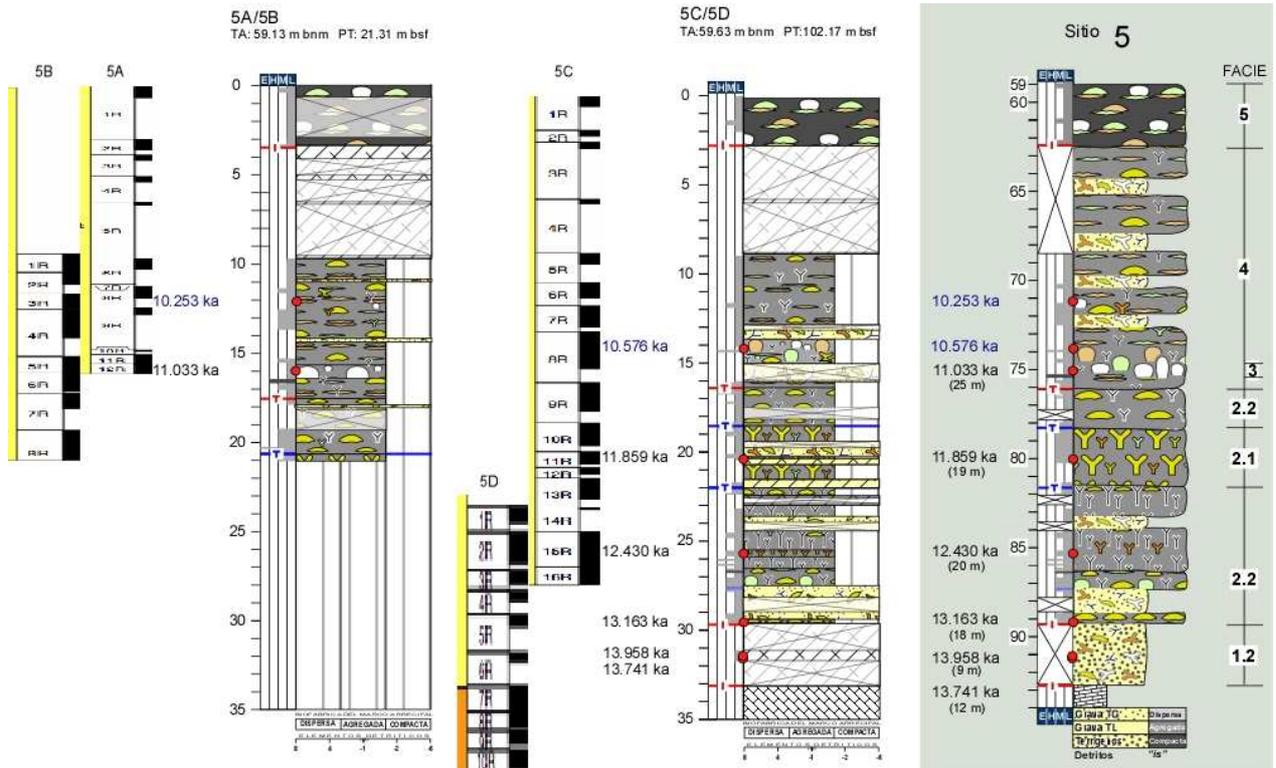


Figura 9. Resumen de sitio 5, conformado por los pozos 5A, 5B, 5C y 5D. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección fechada, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra, los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

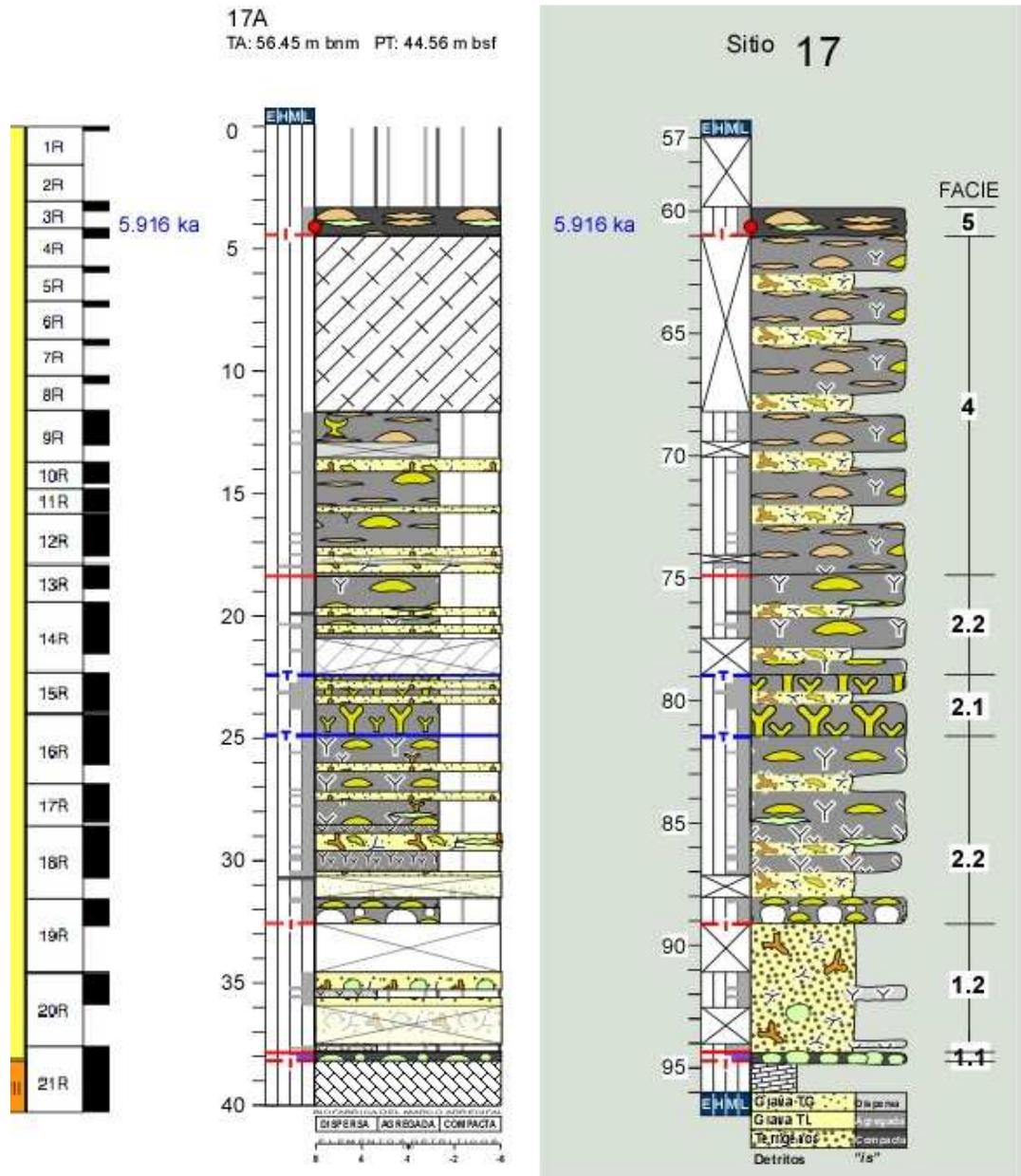


Figura 10. Resumen de sitio 17. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección fechada, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{TH}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra, los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la

perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

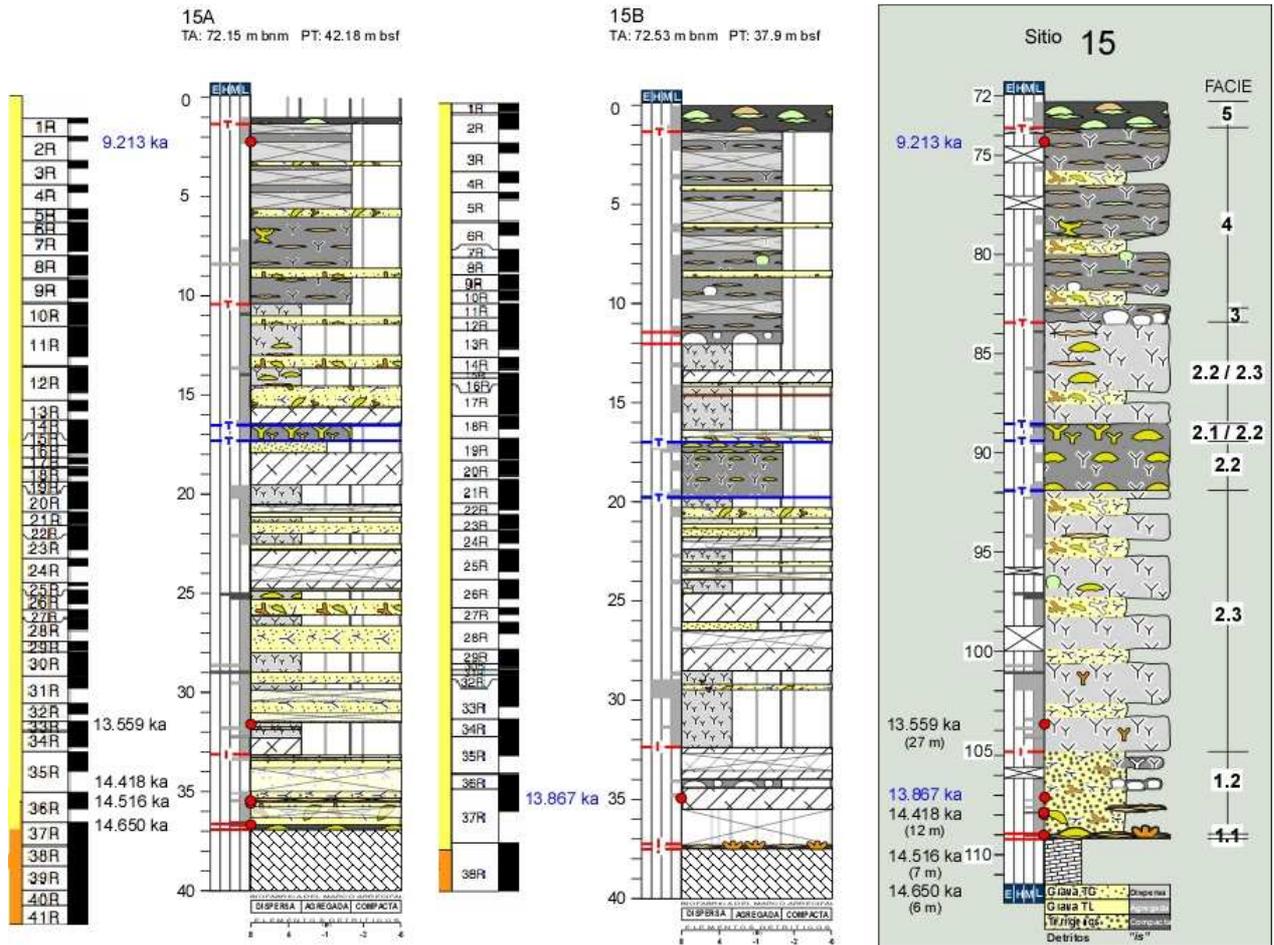


Figura 11. Resumen de sitio 15, conformado por los pozos 15A y 15B. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección fechada, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra, los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

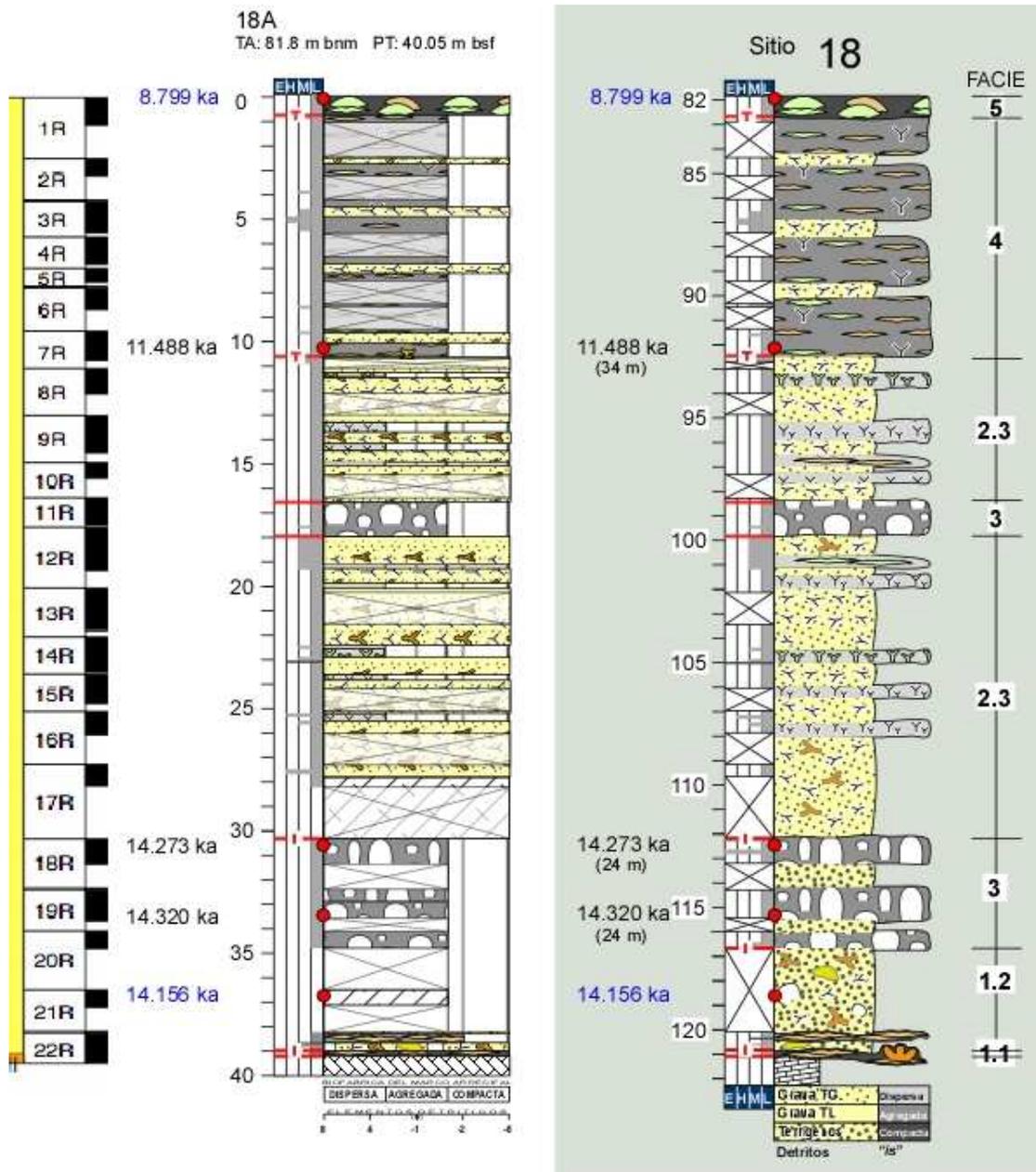


Figura 12. Resumen de sitio 18. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección fechada, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{TH}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra, los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

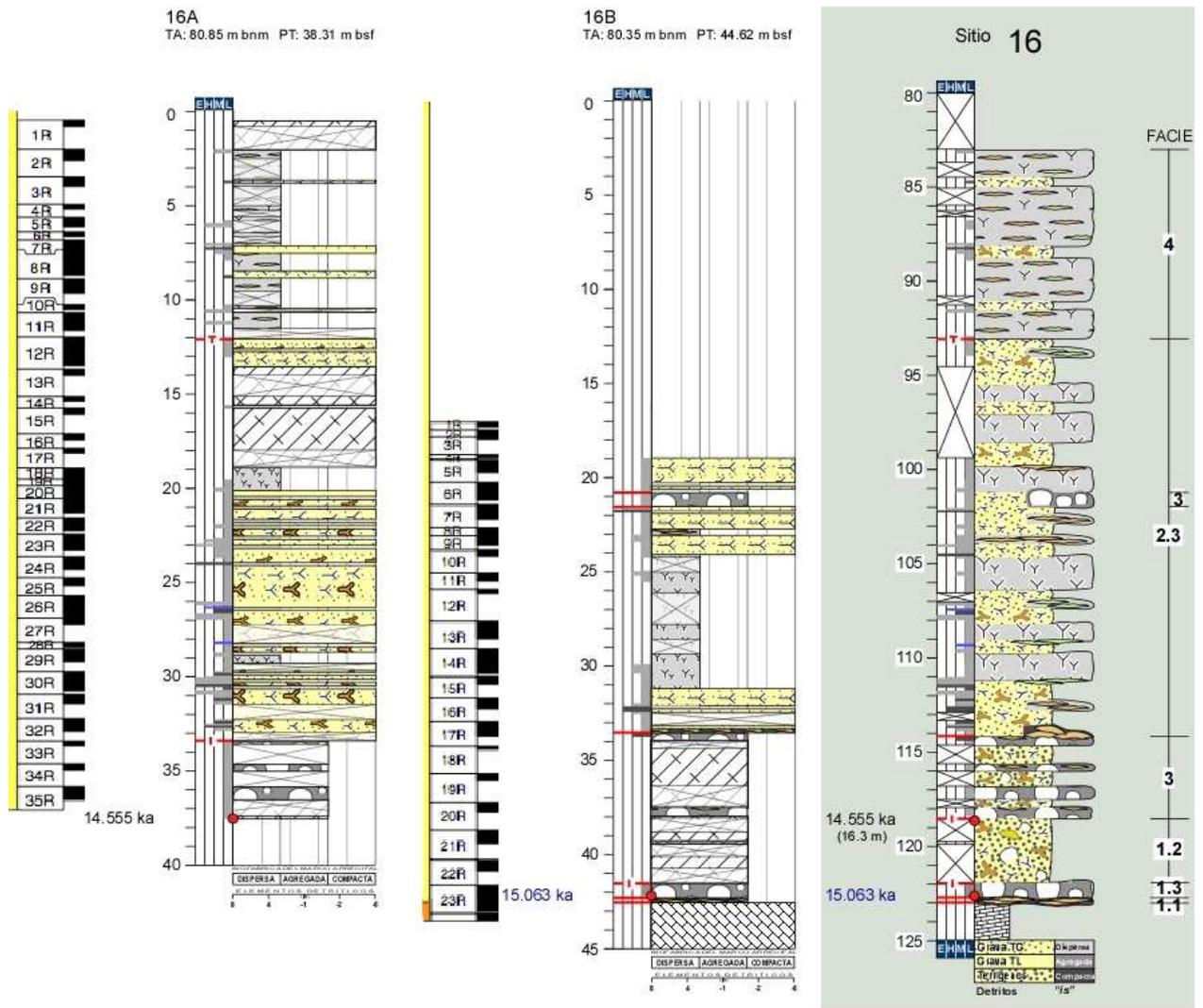


Figura 13. Resumen de sitio 16, conformado por los pozos 16A y 16B. Se presentan los datos del tirante de agua (TA) en metros bajo el nivel del mar (mbnm) y de la profundidad total (PT) en metros bajo el fondo marino (mbfm). La escala lateral izquierda del pozo señala la profundidad en metros, seguida por el indicador de cCA: ligera (L), moderada (M), fuerte (F) y extrema (E). Los círculos rojos muestran la sección fechada, se anotaron con letras negras las edades $^{230}\text{U}/\text{TH}$ y en azul las ^{14}C cal, ambas en kilo años antes del presente (ka AP). La simbología corresponde a la presentada en la figura 7. La barra lateral a la izquierda de cada pozo, indica en amarillo el arrecife postglacial y en naranja el basamento Pleistocénico; con número y letra, los núcleos que conforman el pozo; y en barras negras solidas y a rallas, el material recuperado y el material perturbado por la perforación, respectivamente. En un cuadro gris se muestra el resumen del sitio y a su costado derecho la distribución de facies.

3.2 DESCRIPCIÓN DE FACIES

En el conjunto de núcleos analizados se identificaron cinco facies, las cuales se describen a continuación:

FACIES 1. Detritos y Ensamble Arrecifal Multimórfico con matriz arenosa y biolita ausente

- 1.1 Colonias de coral encostrantes de biofábrica compacta
- 1.2 Detritos con matriz arenosa
- 1.3 *Porites* masivos de biofábrica agregada

FACIES 2. Ensamble Arrecifal de Corales Ramificados

- 2.1 *Acroporas* ramificadas robustas y otros ramificados
- 2.2 Placas de *Acropora* y corales ramificados
- 2.3 *Porites* ramificados delgados.

FACIES 3. Ensamble arrecifal de *Porites* masivos en parches y continuos

FACIES 4. Ensamble Arrecifal de corales con forma de Hoja

FACIES 5. Ensamble Arrecifal Compacto Encostrante con biolita escasa

Las cinco facies se encontraron en todos los sitios, ya sea en su totalidad o por medio de las subfacies, con excepción de la facies 3, que no se encontró en el sitio 17, y la Facies 5, que no se encontró en el sitio 16. En general la facies 2, es la que constituyó el mayor volumen de los núcleos y la que tuvo el espesor más delgado fue la subfacies 1.1.

Todas las facies estuvieron conformadas por secuencias de rocas carbonatadas arrecifales, donde los corales se encuentran soportados por biolita bien desarrollada, a excepción de la facies 1, en donde ésta no se observó, y de la facies 5, en donde fue escasa. En general, tanto los corales *in situ* como los clastos, presentaron bioerosión y cCA ligeros. Los detritos se encontraron intercalados con el ensamble arrecifal y tuvieron un volumen que varió desde un 10%, en la subfacies 1.1, hasta un 80% en la facies 2.3.

FACIES 1. Detritos y Ensamble Arrecifal Multimórfico con matriz arenosa y biolita ausente.

Facies identificada por la presencia de matriz arenosa esquelética volcánoclastica, bien clasificada y ausencia de biolita como soporte entre corales. Se tienen 3 subfacies:

- 1.1 Colonias de coral encostrantes de biofábrica compacta
- 1.2 Detritos con matriz arenosa
- 1.3 Porites masivos de biofábrica agregada

Subfacies 1.1 Colonias de coral encostrantes de biofábrica compacta

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varió de 0.2 a 0.6 m, con el valor mínimo en el sitio 16 y el máximo en el sitio 7. El único sitio que no lo registró fue el 5. A excepción del sitio 17, siempre inició con un contacto basal directo encostrando sobre el basamento Pleistocénico. Finaliza mediante un contacto superior directo con la Subfacies 1.2 en los sitios 17 y 15 e indirecto con la en los sitios 18 y 7, y mediante contacto directo con la Facies 1.3 en el sitio 16.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Es una facies con corales diversos, los más comunes son las hojas de *Montipora* seguidas por ramas robustas de *Pocillopora*, aunque también se tienen placas de *Acropora* y masivos de *Montastraea*. cCA de ligero a moderado, presencia de verméticos menores a 2 mm asociados a un cCA moderado y *Dendropoma máximo* en el sitio 17, en un coral *in situ* con un cCA moderado. La bioerosión llega a ser moderada.

DETRITOS: Principalmente se tienen arenas clasificadas, espinas de equinodermos, el alga verde *Halimeda* y pedacería de conchas, pero ocasionalmente se encuentran fragmentos pequeños de corales ramificados.

Fig. 14. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 1.1. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. En líneas rojas punteadas se muestran los contactos con otras facies. A) Se observan colonias de *Montiporas* que encostran el basamento Pleistocénico y que conforman una biofábrica compacta. B) Colonias de *Montastraeas* encostradas por un cCA moderado, acompañado de verméticos *Dendropoma Máximo*. C) *Acropora* tabular desarrollada sobre el basamento Pleistocénico y en contacto directo con la subfacies 1.2 en su parte superior.



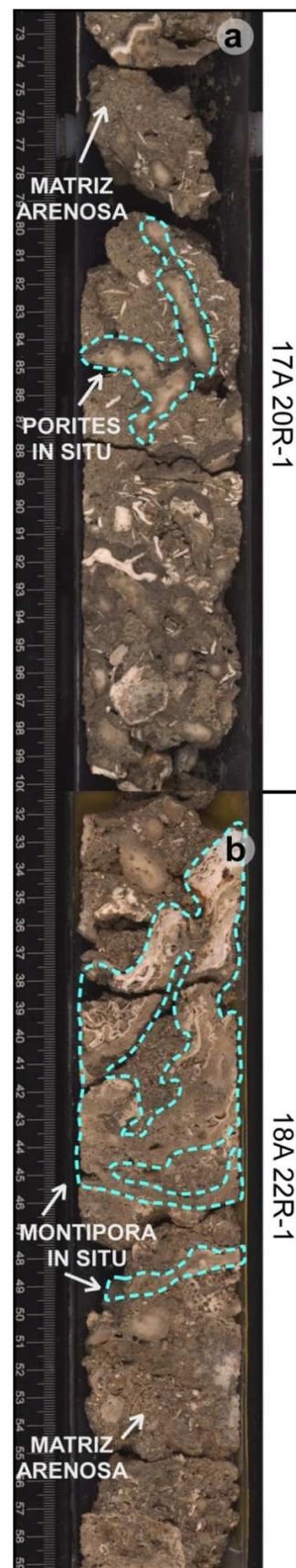
Subfacies 1.2 Gravas con matriz arenosa

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varió de 2.7 a 5.2 m, con el valor mínimo registrado en el sitio 7 y el máximo en el sitio 17. Se encuentra en todos los sitios. Hace contacto basal con la subfacies 1.1 a excepción del sitio 16, donde por medio de un contacto inferido sobre yace a la facies 1.3. Finaliza mediante una serie de contactos inferidos, en los sitios 7, 5 y 17 con la subfacies 2.2, en el sitio 15 con la subfacies 2.3 y en los sitios 16 y 18 con la Facies 3.

DETRITOS: Abundan clastos de *Porites* ramificados intermedios y delgados, y ramificados de Pocillopora. Se encuentran soportados por arena esquelética volcánoclastica bien clasificada y en menor abundancia por Halimeda, pedacería de conchas y espinas de equinodermos. En algunos clastos de corales se observa una capa delgada de biolita, ya que los primeros clastos en depositarse fueron los más grandes y dejaron espacio disponible entre ellos, permitiendo que la biolita se desarrollara dentro de éstas cavidades, hasta que la arena comenzó a infiltrarse impidiendo que la biolita siguiera creciendo. El cCA en los clastos llega a ser moderado.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Se observan colonias escasas e intermitentes de *Porites lichen rus* ramificados pequeños, delgados e intermedios y hojas encostrantes de *Montipora*, así como algunas posibles colonias de masivos de *Porites in situ* en el sitio 15. Al igual que en los detritos, en algunas colonias de coral se observa una capa delgada de biolita.

Fig. 15. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 1.2. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. Las líneas azules punteadas indican colonias *in situ* dentro de la facies detrítica. A) Clastos de corales ramificados (algunos de ellos con cubiertos por una capa delgada de biolita), Halimeda y pedacería de conchas, envueltos en una matriz arenosa color café oscuro. B) Clastos de corales ramificados, Halimeda y pedacería de conchas, envueltos en una matriz arenosa color café claro.



Subfacies 1.3 *Porites* masivos de biofábrica agregada

DISTRIBUCIÓN: Su espesor es de 0.9 y sólo se encuentra en el sitio 16. Contacto basal directo con la subfacies 1.1, y finaliza mediante un contacto superior inferido con la subfacies 1.2

ENSAMBLE ARRECIFAL: Facies conformada por masivos pequeños de *Porites lobata*. La bioerosión rara vez llega a ser moderada. Se caracteriza por no tener biolita.

DETRITOS: No se observan detritos litificados dentro de la facies.

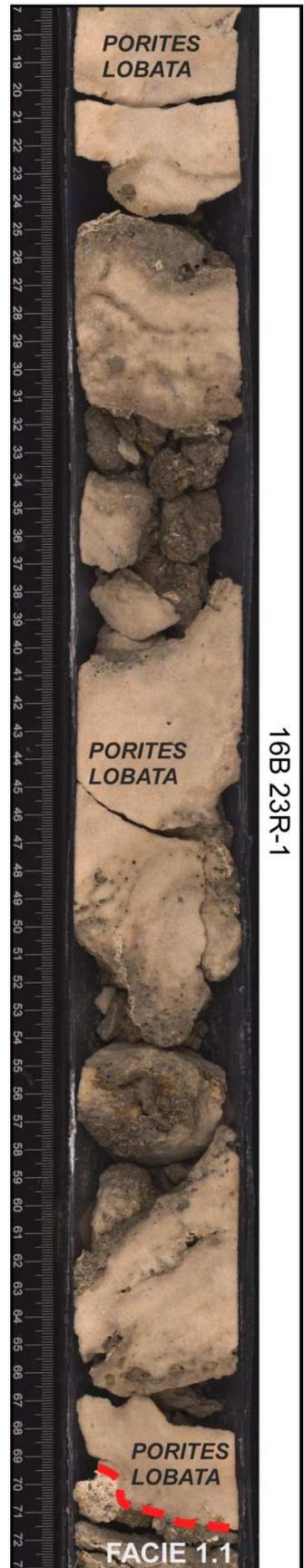


Fig. 16. Imagen en alta resolución del núcleo 23R-1 del sitio 16B, que pertenece a la subfacies 1.3. El contacto directo con la facies 1.1 se indica mediante una línea roja punteada. Biofábrica agregada conformada por masivos de *Porites lobata*, sin presencia de biolita.

FACIES 2. Ensamble arrecifal agregado de corales ramificados

DISTRIBUCIÓN: Esta facies se desarrolla potentemente en todos los sitios, su espesor varía de 13.2 a 21.5 m con el valor mínimo registrado en el sitio 5 y el máximo en el sitio 17. Tiene un contacto basal inferido con la facies 1.2 en los sitios 7, 5, 17 y 15, y en los sitios 18 y 16, sobre yacen la facies 3 de *Porites* masivos en parches y continuos mediante un contacto basal inferido en 18 y directo en 16. Finaliza mediante un contacto superior transicional con la facies 4 en los sitios 7, 5 y 15, el contacto está relacionado con la presencia de corales masivos pequeños, en su mayoría *Porites*.

En general, algunos de los detritos encontrados en esta facies muestran dos características distintivas: una capa de cCA al término de la última colonia seguida por un aporte detrítico y clastos aglomerados envueltos por cCA, que no presentan bioerosión en su interior.

La facies 2 presenta tres subfacies:

- 2.1 Acroporas ramificadas robustas y otros ramificados
- 2.2 Placas de Acropora y corales ramificados
- 2.3 *Porites* ramificados delgados.

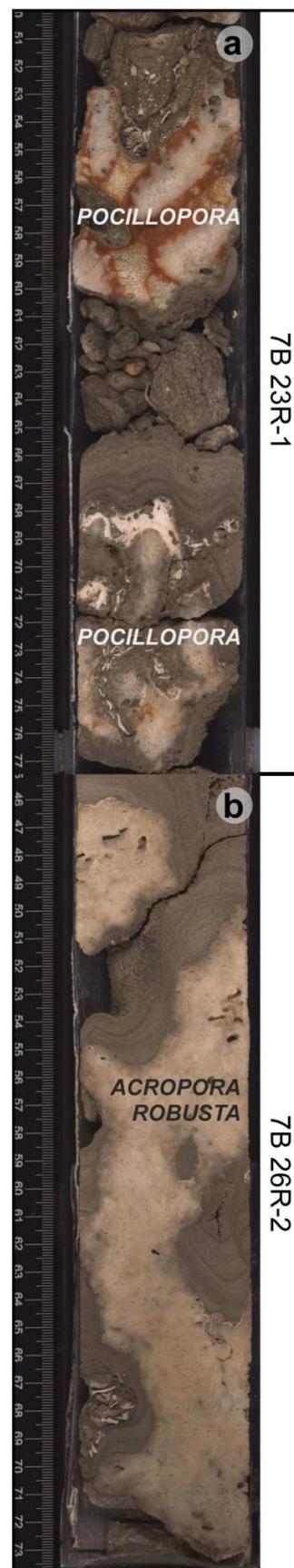
Subfacies 2.1 Acroporas ramificadas robustas y otros ramificados

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varia de 0.8 a 6.7 m, con el valor mínimo en el sitio 15A y el máximo en el sitio 7. Se registró en los sitios 7, 5, 17 y el pozo 15A, presenta un contacto transicional tanto en su base como en su cima con la subfacies 2.2. El sitio 7 tiene el espesor máximo de 6.7 m y el mínimo en 15A con 0.8 m.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Biofábrica agregada que presenta en todos los sitios *Acroporas* ramificadas robustas, en su mayoría grandes, acompañadas por corales ramificados intermedios de los géneros *Pocillopora* y *Porites* en el sitio 7 y de *Pavona* en el sitio 5. cCA ocasionalmente moderado que fue más común conforme aumenta la profundidad.

DETRITOS: Escasos corales ramificados de *Acropora* y *Pocillopora*, acompañados por el alga *Halimeda*, poca arena y conchas. La sección donde se encuentra la menor presencia de clastos, es en la sección de corales ramificados robustos de *Acropora*. Se observa un cCA que llega a moderado y una bioerosión ocasionalmente moderada. Presencia de verméticos menores a 2 mm asociados a un cCA moderado en el sitio 7.

Fig. 17. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.1. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. A) Se observan colonias de *Pocillopora*, que en orden ascendente, la primera muestra un cCA moderado y la segunda sostiene detritos entre sus ramas. B) Colonia de *Acropora robusta* sin presencia de cCA, soportada completamente por biolita.



Subfacies 2.2 Placas de *Acropora* y corales ramificados

DISTRIBUCIÓN: El espesor total varía de 7.7 a 11.8 m, con el valor mínimo en el sitio 15 y el máximo en el sitio 17. Presente en los sitios 7, 5 y 17. Se encuentra sobre yaciendo a la facies 1.2 y subyace la Facies 4, y en el sitio 15 sobre yace la Facies 2.3 y subyace la facies 4.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Presenta una biofábrica agregada, a excepción del pozo 15A que es dispersa. Se identifica principalmente mediante la presencia de corales en forma de placas de *Acropora* y ramificados delgados de *Porites*, los cuales son acompañados por ramificados intermedios de *Porites*, ramificados robustos de *Pocillopora* y masivos de *Montastraea* y *Porites* en el sitio 7, por corales en hoja de Agaricidae, masivos de los géneros *Favia* y *Montastraea* en el sitio 5. El cCA llega a ser moderado. Presencia de verméticos menores a 2 mm asociados a un cCA moderado en el sitio 7.

DETRITOS: Clastos de corales de los géneros *Acropora*, *Pocillopora*, *Porites*, *Halimeda*, arena ocasional y espinas de equinodermos. La bioerosión llega a ser moderada, rara vez fuerte en el sitio 7. Presencia de verméticos menores a 2 mm asociados a un cCA fuerte y moderado, en el sitio 7 y 5 respectivamente y un vermético *Dendropoma máximum* (4mm), asociado a un cCA moderado en el sitio 5.

Fig. 18. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.2. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. En líneas amarillas punteadas se indican los clastos dentro de la facies. A) Se muestra una *Acropora* tabular *in situ* encostrada por un cCA moderado, la *Acropora* se encuentra sosteniendo clastos de corales ramificados. B) Colonias *in situ* de *Pocillopora* y *Porites* C) Conglomerado de clastos envueltos por un cCA extremo.



Subfacies 2.3 Porites ramificados delgados

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varió de 13 a 18 m, con el valor mínimo en el pozo 15A y el máximo en el pozo 15B. Presente en los sitios 15, 18 y 16. Tiene un contacto basal inferido con la subfacies 1.2 en el pozo 15A, en el 15B hay un contacto inferido con la subfacies 1.3 y transicional con la subfacies 2.2. El sitio 18 muestra un contacto inferido con la subfacies 1.3 y la facies 3, al igual que el pozo 16B, con la diferencia de que en el 16B, el contacto es directo con ambas facies.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Es una biofábrica dispersa compuesta en su mayoría por corales ramificados cortos y delgados de *Porites lichen* y *P. rus*, que tienen como característica típica, un contacto basal encostrante directo sobre los detritos que les subyacen. En el sitio 16 además hay corales ramificados encostrantes (hojas y placas) del género *Montipora* y corales poco frecuentes (de la familia Agaricidae y del género *Pavona*); en el sitio 18 se muestran algunas colonias de corales ramificados intermedios del género *Pavona*. Presenta cCA en ocasiones moderado, rara vez extremo. Presencia de vermétidos menores a 2 mm, asociados a un cCA moderado en los sitios 15 y 16.

DETRITOS: *Halimeda*, conchas, poca arena, espinas de equinodermos, clastos de corales de los géneros *Porites*, *Pocillopora*, *Acropora*, *Montipora* y pocas colonias de los géneros *Pavona* y *Acropora*. cCA que llega a ser moderado, en ocasiones extremo en el sitio 16 y en general la bioerosión alcanza niveles moderados. Presencia de vermétidos menores a 2mm asociados a cCA que va desde ligero hasta extremo en los sitios 17, 15, 18 y 16. En el sitio 16 se encuentran vermétidos *Dendropoma maximum* (4 mm) asociados a un cCA moderado y extremo.

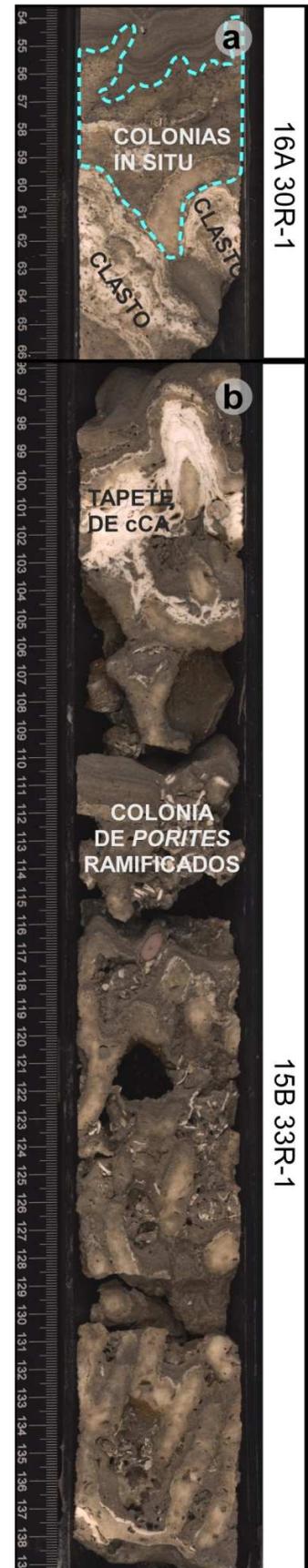


Fig. 19. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la subfacies 2.3. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen.. A) Se muestran clastos de coral, sobre los cuales, crecieron colonias encostrantes del género *Pavona*. B) Colonias ramificadas del género *Porites* que muestran al final de su crecimiento un capa de cCA fuerte. El basamento encostrante de la colonia se puede observar a los 138 cm del núcleo. Los corales de *Porites* sostienen entre sus ramas restos de Halimeda y de espinas de equinodermo.

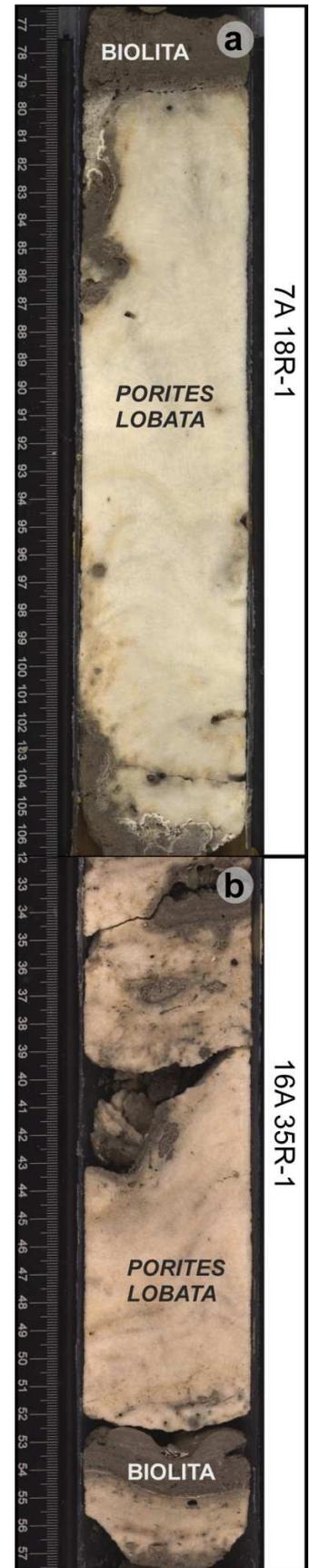
FACIES 3. Ensamble arrecifal de Porites masivos en parches y continuos.

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varía de 0.6 a 4.5 m. Facies lateralmente persistente en los sitios 16 y 18 y con geometría de mosaico a manera de parches en todos los sitios a excepción del 17.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Corales masivos del género *Porites* en general de tamaño chico, acompañados por colonias medianas de *Porites* en el sitio 7. En el pozo 5A y en el sitio 18, se presenta una biofabrica agregada. El cCA es generalmente nulo o ligero a excepción del pozo 7B, donde llega a ser moderado; la bioerosión también llega a ser moderada en éste sitio concentrándose principalmente en los bordes.

DETRITOS: En su mayoría colonias de masivos de *Porites*, aunque también se observan corales ramificados delgados de *Pocilloporas* y *Acroporas* tabulares. Bioerosion y cCA moderados.

Fig. 20. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 3. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. A) Colonia mediana de *Porites lobata* envuelta por biolita. Base encostrante a los 106 cm del núcleo. B) Colonias pequeñas de *Porites lobata* con presencia de biolita.

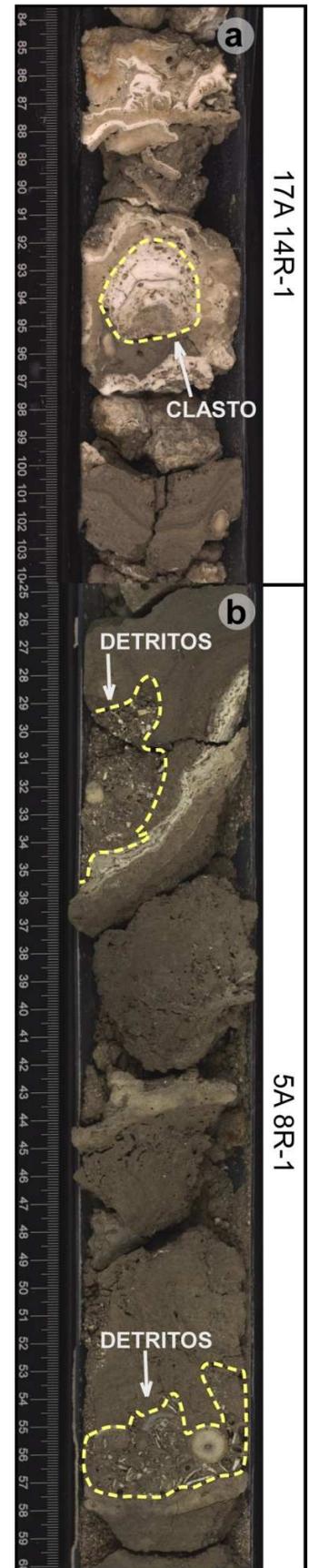


FACIES 4. Ensamble arrecifal de corales con forma de Hoja

DISTRIBUCIÓN: El sitio 7 tiene el espesor máximo de 17 m, y para los núcleos 15, 16 y 18 se registra un promedio de 10 m. Por falta de recuperación no se puede establecer el valor para los sitios 5 y 17. Se registra en todos los sitios. El contacto basal con la subfacies 2.2, es transicional en los sitios 7, 5 y en el pozo 15A, y directo en el sitio 17; contacto basal directo con la facies 3 en el pozo 15B y transicional con la subfacies 2.3 en los sitios 18 y 16.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Facies determinada por tres características: 1) Aparición de coral del género *Montipora* en forma de hojas; 2) Desaparición de corales de *Acropora* tabular (en los sitios del Este con mayor batimetría); 3) Abundancia de corales en forma de hojas en general. Tiene como característica principal, que las hojas *in situ* se encuentran encostrando los detritos. Las colonias de *Montipora* se vuelven abundantes conforme aumenta la profundidad, se encuentran acompañadas por colonias en forma de hoja de la familia Agaricidae y a excepción de los sitios 7 y 18 por colonias de coral de los géneros *Leptastrea* y *Pachyseris*; corales ramificados de *Porites* pequeños, con mayor abundancia en el sitio 15; colonias de ramificados intermedios cortos de *Pocillopora* y *Pavona* en 7; tablas de *Montipora* en 17 y de *Acropora* en 7, 5 y 17; abundantes corales masivos de *Porites* acompañados por *Favias* en el sitio 7. Se observa una biofábrica agregada en todos los sitios a excepción del sitio 16, donde se presenta de manera dispersa. En el sitio 7 el cCA presenta algunos espesores moderados y en los sitios de mayor profundidad son en su mayoría nulos. La bioerosión llega a ser moderada. En el sitio 17 hay presencia de verméticos menores a 2 mm relacionados con un cCA moderado.

DETRITOS: Aporte detrítico discontinuo de corales morfológicamente diversos (*Acropora*, *Pocillopora*, *Porites*; Fungiales y *Montipora* en el sitio 16), acompañados por arena y *Halimeda* escasas; éste aporte va disminuyendo de manera gradual, hasta



prácticamente desaparecer al llegar a la Facies 5. cCA de ligero a fuerte, bioerosión que llega a moderada. Presencia de verméticos menores a 2 mm asociados a un cCA, que va desde ligero hasta fuerte.

Fig. 21. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 4. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. En líneas amarillas punteadas se muestran los elementos detríticos dentro de la facies. A) Se observa un clasto encostrado por colonias de *Agaricias* y *Leptastreas in situ*. B) Biofabrica agregada de colonias de *Montipora* en forma de hoja. Se muestran depósitos detríticos sobreyaciendo en los corales *in situ*. Algunas de las colonias no muestran cCA.

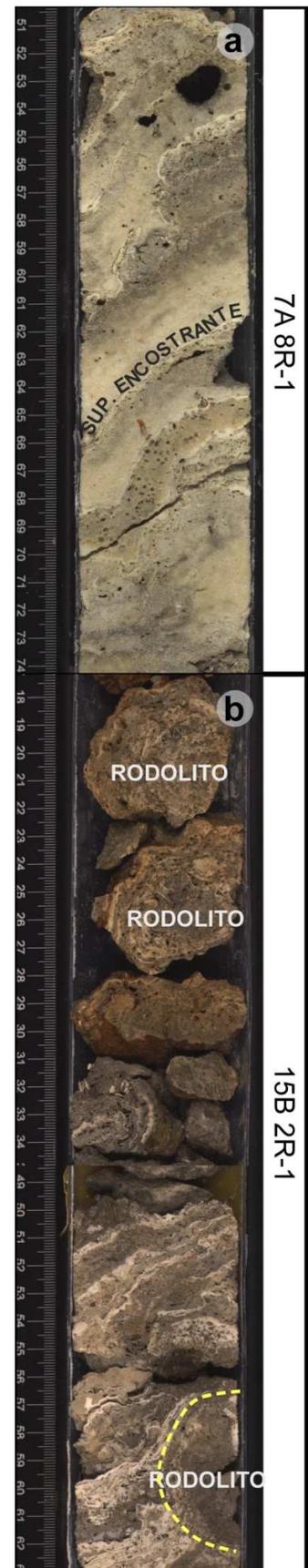
FACIES 5. Ensamble arrecifal Compacto Encostrante con biolita escasa.

DISTRIBUCIÓN: Su espesor varió de 1 a 4 m, con el valor mínimo en el sitio 18 y el máximo en el sitio 7. El sitio 16 es el único donde no se registra. Sobre yace la facies 4, presentando un contacto basal inferido en los sitios 7, 5 y 15 y transicional en los sitios 15 y 18.

ENSAMBLE ARRECIFAL: Se conforma principalmente por colonias de coral en forma de placas y hojas de los géneros *Montipora* y *Porites* y de la familia *Agaricidae*, en menor cantidad y disminuyendo su frecuencia con forme se aumenta la batimetría. En el sitio 7 se tienen corales en forma de hojas y placas de *Astreopora*, en los sitios 7 y 15 de *Favia*, en el sitio 5 de *Psacommora* en los sitios 5 y 15 de *Pachyseris speciosa* y en los sitios 5 y 18 de *Pavona varians*. Presencia de serpúlidos y gastrochaenolites; bioerosión de moderada a intensa.

DETRITOS: Ubicados principalmente al final de la facies en todos los sitios a excepción del sitio 17, se observan algunos rodolitos o clastos de formas irregulares asociados a homotremas y encostrados por corales *in situ*. No hay presencia de biolita a excepción de bordes ligeros en algunos corales.

Fig. 22. Imágenes en alta resolución de núcleos que pertenecen a la facies 5. En la barra lateral derecha se indica el nombre del pozo y del núcleo al que corresponde cada imagen. A) Colonias encostrantes de *Montiporas*, *Favidos* y *Agaricias*. Muestran cCA ligero y nulo desarrollo de biolita. B) Rodolitos depositados generalmente al final de la facies 4. En ocasiones, los rodolitos son encostrados por las colonias *in situ*, como se indica con la línea amarilla.



3.3 INTERPRETACIÓN DE FACIES

Al terminar la identificación y descripción de facies, se elaboró un esquema de correlación estratigráfica (Fig. 23) con base en la Ley de Walther, que establece que si dos facies diferentes se encuentran superpuestas, y no están separadas por una discontinuidad (discordancia o hiatus), deben de corresponder a depósitos en ambientes adyacentes en un punto en el tiempo. En esta correlación entre sitios se puede observar la geometría y continuidad de las facies.

A excepción de las facies 1 y 2, todas presentan variación lateral de Oeste a Este, que van de ensambles arrecifales agregados muy diversos en los sitios 7 y 5, pasando por una transición de menor diversidad en el sitio 17 y biofabricas agregadas con dispersas en el sitio 15, a diversidad pobre y predominio de biofábricas dispersas en los sitios 18 y 16. Formando parte de esta variación lateral, se tiene que el aporte de detritos va en aumento de Oeste a Este, dando como resultado que la facies 2.3 sea la más potente de todas las facies, aún cuando su ensamble arrecifal es intermitente y de biofábrica dispersa.

La variación lateral en diversidad y cantidad de detritos está dada por la profundidad, que controla la cantidad de luz, y por la pendiente, que controla el aporte detrítico; ambas van en aumento de Oeste a Este, por lo que el sitio 7 tiene la mayor diversidad y un aporte de detritos bajo, mientras que el sitio 16 tiene una diversidad pobre y mayor cantidad de detritos que los demás sitios.

La secuencia inicia con la subfacies 1.1, que corresponde a un arrecife bordeante desarrollado dentro de los primeros 5 metros de profundidad, en una zona de oleaje fuerte y continuo. Es el primero en depositarse al colonizar el substrato disponible encostrandolo y desarrollando una biofábrica densa. Se observan corales encostrantes en forma de hoja, masivos y ramificados ecomorfos de ramas robustas y compactas, característicos de este tipo de ambientes de oleaje de alta energía.

En el sitio 16, sobre yaciendo a la subfacies 1.1, está la subfacies 1.3 que se desarrolló dentro de un ambiente lagunar, por lo que se encuentra en sucesión estratigráfica sobre el arrecife bordeante. Posteriormente se deposita la subfacies detrítica 1.2, que muestra un comportamiento transgresivo, depositándose en todos los sitios. Como variación lateral se tiene el depósito de la facies 3 dentro de los sitios 16 y 18, donde los corales masivos del género *Porites* acrecieron en aguas profundas, desarrollando inclusive colonias de tamaños medianos en el sitio 18.

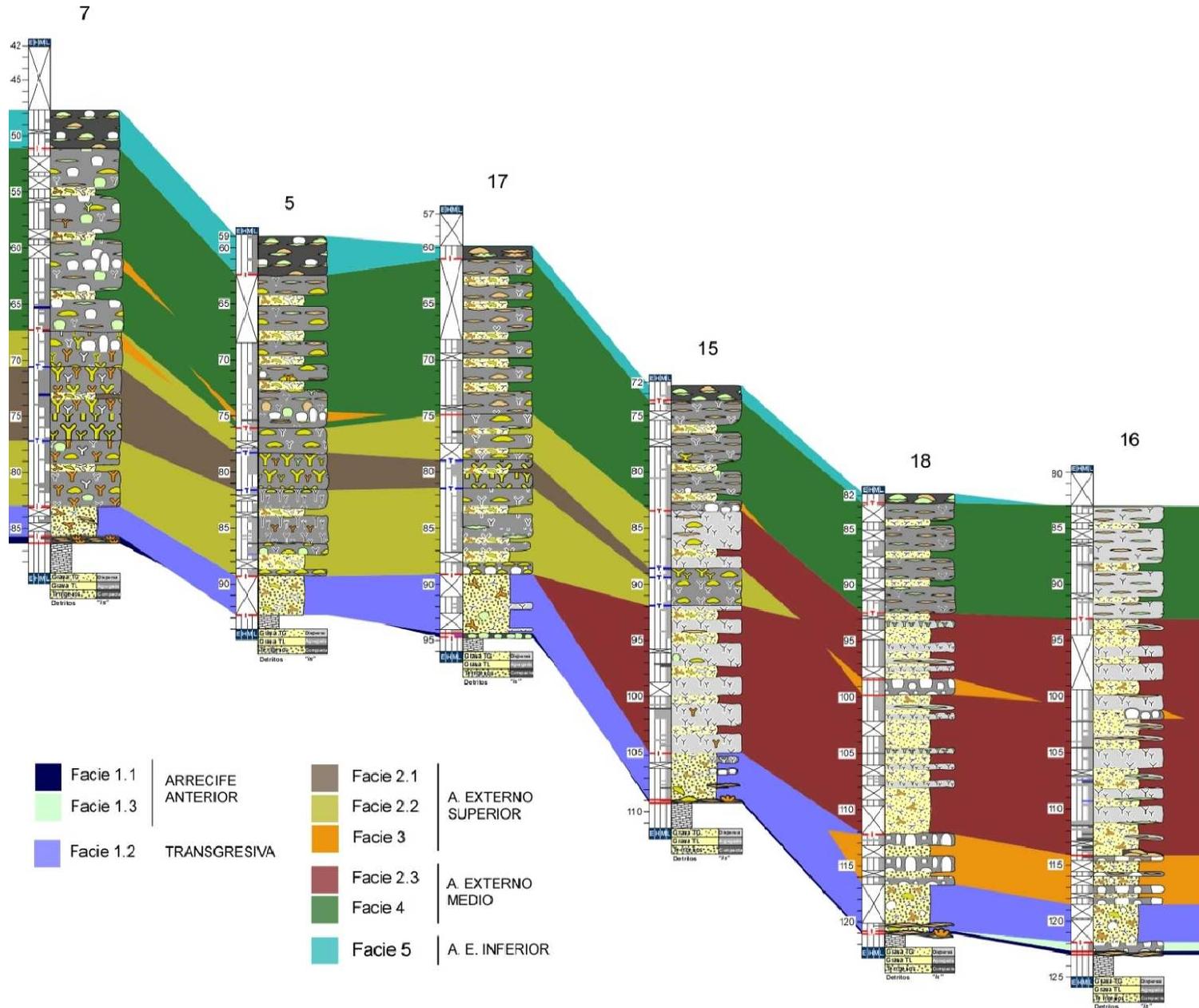


Figura 23. Correlación estratigráfica de todos los sitios en Mara'a

A continuación se desarrolla la facies 2, que abarca desde el talud superior hasta el inferior. Debido a su variabilidad se describirá por sitios:

Los sitios 7, 5 y 17 inician con la subfacies 2.2 de colonias de *Placas de Acropora* y corales ramificados, acompañados por abundantes corales masivos. Posteriormente, se desarrolla la subfacies 2.1 de corales *Acroporas* ramificadas robustas y otros ramificados, para nuevamente volver a la subfacies 2.2, aunque esta vez sin la presencia de corales masivos a excepción del sitio 7, donde se observa el desarrollo de la facies 3. Estos sitios denotan la diferencia que marca la batimetría dentro del ensamble arrecifal, ya que el sitio 7, con 20 m menos de profundidad que el sitio 5 y el sitio 17, muestra la mayor diversidad y el mejor desarrollo coralino de entre los tres sitios.

El sitio 15 comienza con el desarrollo de la subfacies 2.3 de corales ramificados delgados del género *Porites* (talud intermedio) y le siguen las facies 2.2. Posteriormente los pozos 15A y 15B desarrollaron diferentes facies. El pozo 15A registra la facies 2.1, mientras que el 15B continua desarrollando la 2.2; seguido de éstas facies, en el pozo 15A se deposita nuevamente la facies 2.2 pero ahora con una biofábrica dispersa y en el pozo 15B crece la facies 2.3 como una variación lateral.

Los sitios 18 y 16 inicialmente desarrollan la subfacies 2.3, seguida por un pequeño segmento de la facies 3 y vuelve nuevamente a presentar la subfacies con la que inicio. La subfacies 2.3 tiene su mayor espesor en el sitio 16, dado por una pendiente de 25 grados, que ocasiona un aporte detrítico abundante.

La facies 3 a excepción de la desarrollada en la base en de los sitios 16 y 18, se establece bajo una geometría de parches, por lo cual no tiene un patrón definido. Esta facies es característica de aguas intermedias a profundas (15 - 30 m).

.Posterior al depósito de la facies 2 se tiene la facies 4, con predominio de corales con forma de hojas y placas que suelen crecer en zonas con poca cantidad de luz. En los sitios 7, 5 y 17 pertenece al talud superior-intermedio y en los sitios 15, 18 y 16 al talud intermedio-inferior. Esta facies se desarrolla a mayores profundidades y el aporte detrítico disminuye notablemente en comparación con la facies 2. Sin aporte detrítico significativo, y con corales de mayor volumen conformando la facies en el lado Oeste, como lo son los corales masivos y de *Acropora* tabular, se

tienen el efecto inverso que en la facies 2, el espesor va decreciendo hacia el Este, conforme éstos corales de gran volumen van dejando de formar parte del ensamble arrecifal.

Por último se depositó la facies 5, que corresponde al talud intermedio-inferior. Muestra poco espesor, el cual disminuye hacia el Este debido a las mismas causas que en la facies 4, con la diferencia de que los corales que proporcionan volumen a la facies del lado Oeste, son principalmente colonias de *Porites* masivos.

3.4 MODELO DE ZONACIÓN

La zonación en los ensambles coralinos varía de arrecife en arrecife, de acuerdo a los gradientes de energía; bajo diferentes condiciones de oleaje, se pueden desarrollar zonaciones similares a diferentes profundidades (Done 1982; Hongo y Kayanne, 2010). El ámbito dado para una especie de coral puede variar marcadamente de una zona barlovento a una de sotavento, lo cual enfatiza la necesidad de utilizar biozonaciones obtenidas de áreas cercanas a los sitios perforados y/o con las mismas características como el grado de energía (Cabioch *et al.*, 1999). Por lo anterior se propone un modelo de zonación exclusivo de la zona sur de Tahití.

En el presente trabajo se le llama paleopropundidad a la profundidad bajo la cual creció el coral fósil, cuando estaba vivo. Se obtuvieron los ámbitos de crecimiento de cada ensamble coralino, con base en las paleopropundidades, las cuales fueron adquiridas al graficar las profundidades corregidas por subsidencia (0.5 mm/año) contra sus edades de $^{230}\text{Th}/\text{U}$, en una curva de nivel del mar (Fig. 24). La curva del nivel del mar (Blanchon y Granados en preparación) se reconstruyó a partir de datos reportados por Bard y colaboradores (2010), con base en núcleos perforados en la barrera arrecifal de Papeete, y con los datos obtenidos en el presente estudio a partir de los núcleos del IODP-310. En la tabla 2 se encuentran los datos de las edades, profundidades y paleopropundidades.

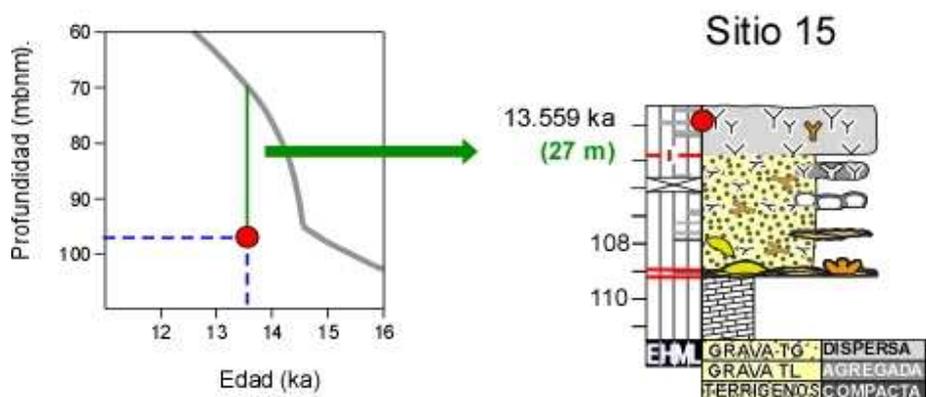


Figura 24. Obtención de las profundidades de ámbito de crecimiento de los corales fechados. Edad representada en kilo años y la profundidad corregida por subsidencia, en metros bajo el nivel del mar. Los valores de profundidad y edad de la muestra, fueron graficadas y la distancia (línea verde) entre el punto graficado y la curva del nivel del mar (línea gris), son los metros de profundidad a los cuales creció el coral fechado. La profundidad de ámbito de crecimiento se colocó entre paréntesis debajo de cada edad $^{230}\text{U}/\text{Th}$.

Con base en las paleopropfundidades presentadas en la Tabla 1, se propone un modelo de zonación para una zona de alta energía (Fig. 25), con variaciones de acuerdo a la profundidad y pendiente del lugar. En el lado Oeste de la zona sur de Tahití, se tienen las menores profundidades con las pendientes más ligeras y en el lado Este se tienen las mayores profundidades con las pendientes más abruptas.

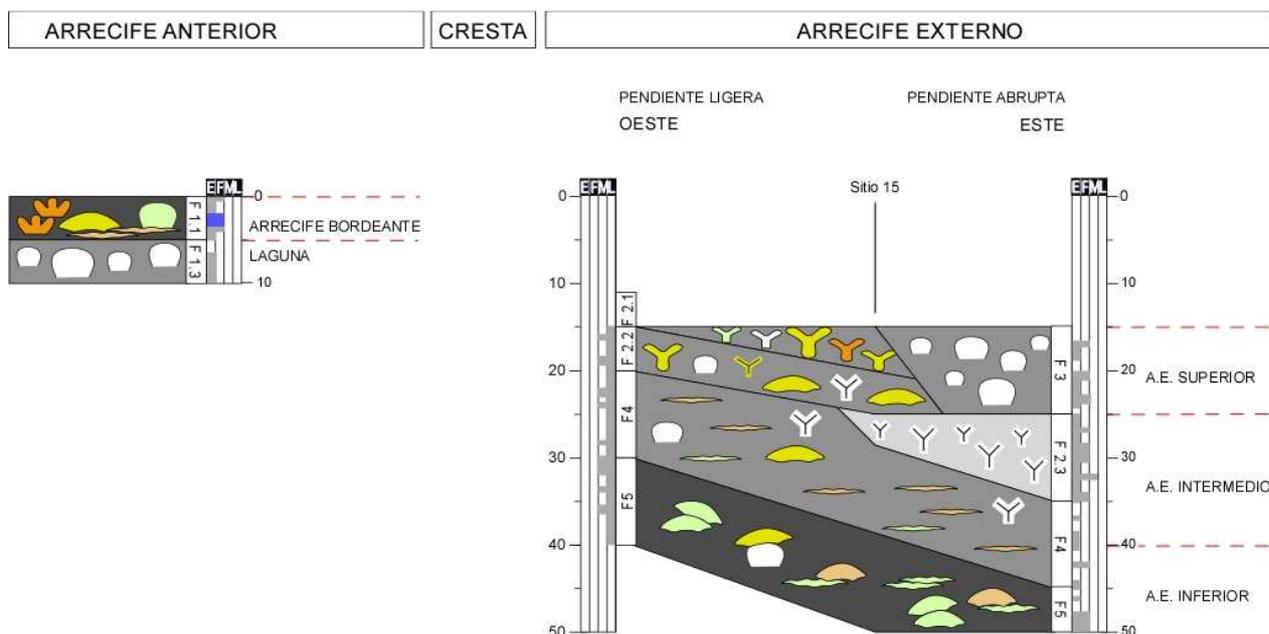


Figura 25. Modelo de zonación para la zona Sur de Tahití, dividido en la zona anterior a la cresta, cresta y arrecife exterior (superior, intermedio e inferior). Códigos de color y simbología de acuerdo a la figura 7. Indicados a los costados se encuentran la escala de profundidad en metros bajo el nivel del mar, el nivel de encostración por cCA y las facies (F) .

Aunque el área sur de Tahití cuenta con poca información acerca de su zonación, por ser una presentar alta energía del oleaje, lo que dificulta su estudio, se tienen registros que concuerdan con el modelo propuesto. En cuanto a las colonias encostrantes de la zona anterior a la cresta, Montaggioni (2005) menciona que dominan una gran variedad de ambientes, desde arrecifes externos profundos que exceden los 20 m de tirante de agua, donde la radiación es mínima, hasta crestas y pendientes arrecifales de alta energía a menos de 15 m de profundidad donde el agua es turbia. A su vez, Bouchon (1985) indica que en los arrecifes modernos de Moorea, a profundidades menores de 6 m, dominan corales ramificados robustos del género *Pocillopora*. Y Harmelin Vivien (1985) también reporta que en zonas de alta energía en el atolón de Tikehau, a profundidades de 0 a 4 m, dominan corales de ramas cortas, masivos y encostrantes.

Los ámbitos de las colonias de corales masivos de *Porites lobata* de la facies 3, concuerdan con los datos proporcionados por Adjeroud *et al.*, (2007), que señalan un alto desarrollo de esta especie en zonas de alta energía a profundidades de 12 a 18 m. Por otro lado, Humblet *et al.*, (2009) hace mención a un grado significativo de parches taxonómicos, dentro de los ensambles en la pendiente arrecifal, relativos a variaciones laterales en el gradiente de inclinación, sedimentación o turbidez, motivo por el cual pudieron haberse establecido los parches de *Porites lobata* masivos en distintas facies.

Con respecto a los corales en forma de placa característicos de la facies 4, Harmelin-Vivien (1985) describe una zona de talud de 25 a 35 m conformada por corales en forma de placa en el atolón de Tikehau. Y siguiendo profundidades aún mayores, se han indicado que géneros como *Porites*, *Montipora*, *Pachyseris* y *Leptoseris* a menudo dominan las comunidades coralinas entre 20 y 70 m en las regiones centrales del Pacífico (Kühlmann, 1983), siendo éste dato congruente con la facies 5.

3.5 HISTORIA DEL DESARROLLO ARRECIFAL

A continuación se muestra el Modelo de Edades elaborado con base en los fechamientos $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y ^{14}C (Fig. 26).

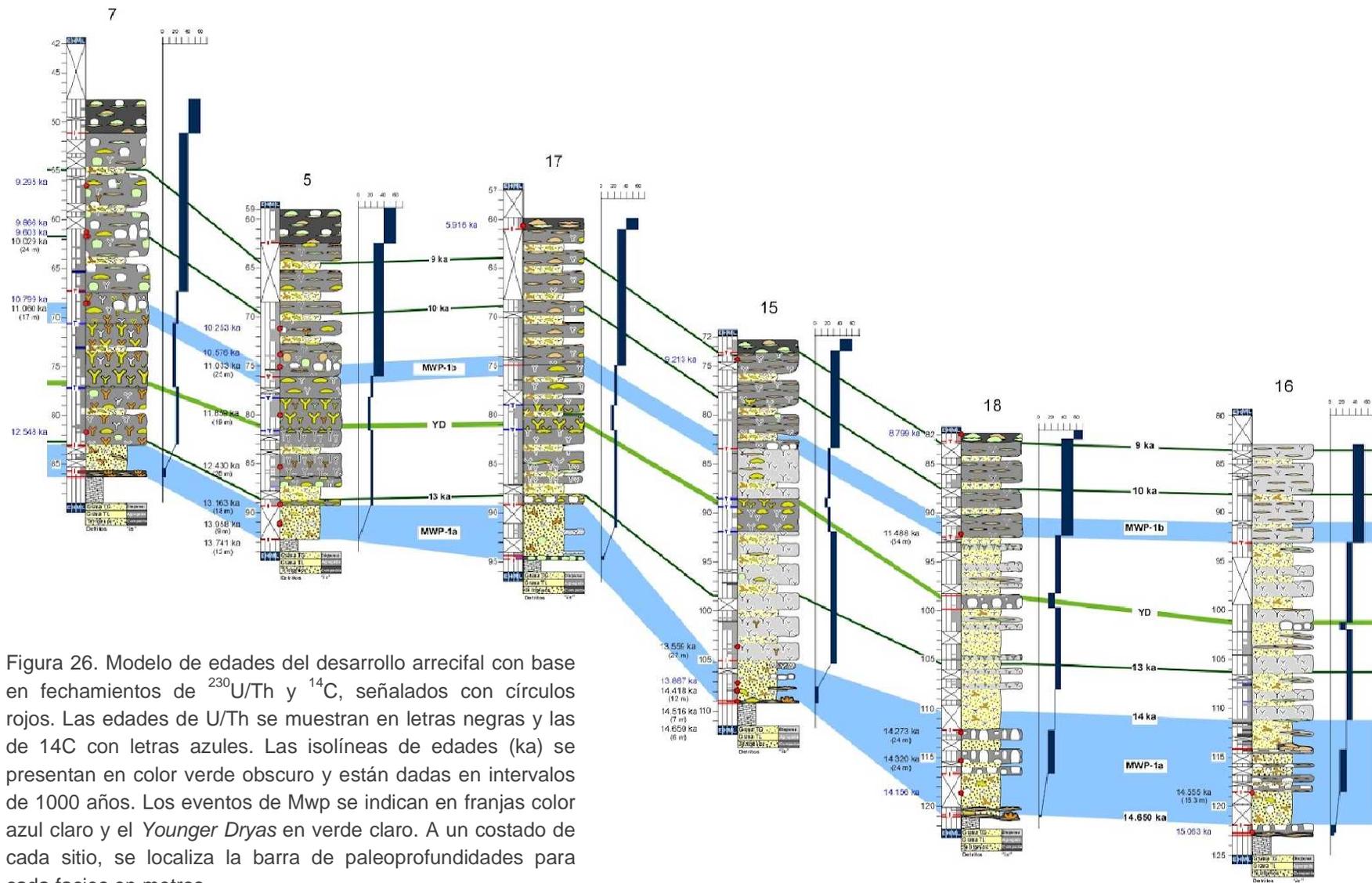


Figura 26. Modelo de edades del desarrollo arrecifal con base en fechamientos de $^{230}\text{U}/\text{Th}$ y ^{14}C , señalados con círculos rojos. Las edades de U/Th se muestran en letras negras y las de ^{14}C con letras azules. Las isolíneas de edades (ka) se presentan en color verde oscuro y están dadas en intervalos de 1000 años. Los eventos de Mwp se indican en franjas color azul claro y el *Younger Dryas* en verde claro. A un costado de cada sitio, se localiza la barra de paleopropundidades para cada facies en metros.

Con base en el modelo de edades, se propone una historia del desarrollo arrecifal para el suroeste de Tahití (Fig. 27). Este desarrollo comenzó con el establecimiento de un arrecife glacial. Los primeros en colonizar el substrato Pleistocénico, en una zona de alta energía, fueron los corales encostrantes de la subfacies 1.1, en los sitios 15, 18 y 16, antes de 14.65 ka, y formaron un arrecife bordeante, que al acresionar desarrolló una laguna somera, la cual se registró en el sitio 16, identificada como facies 1.3.

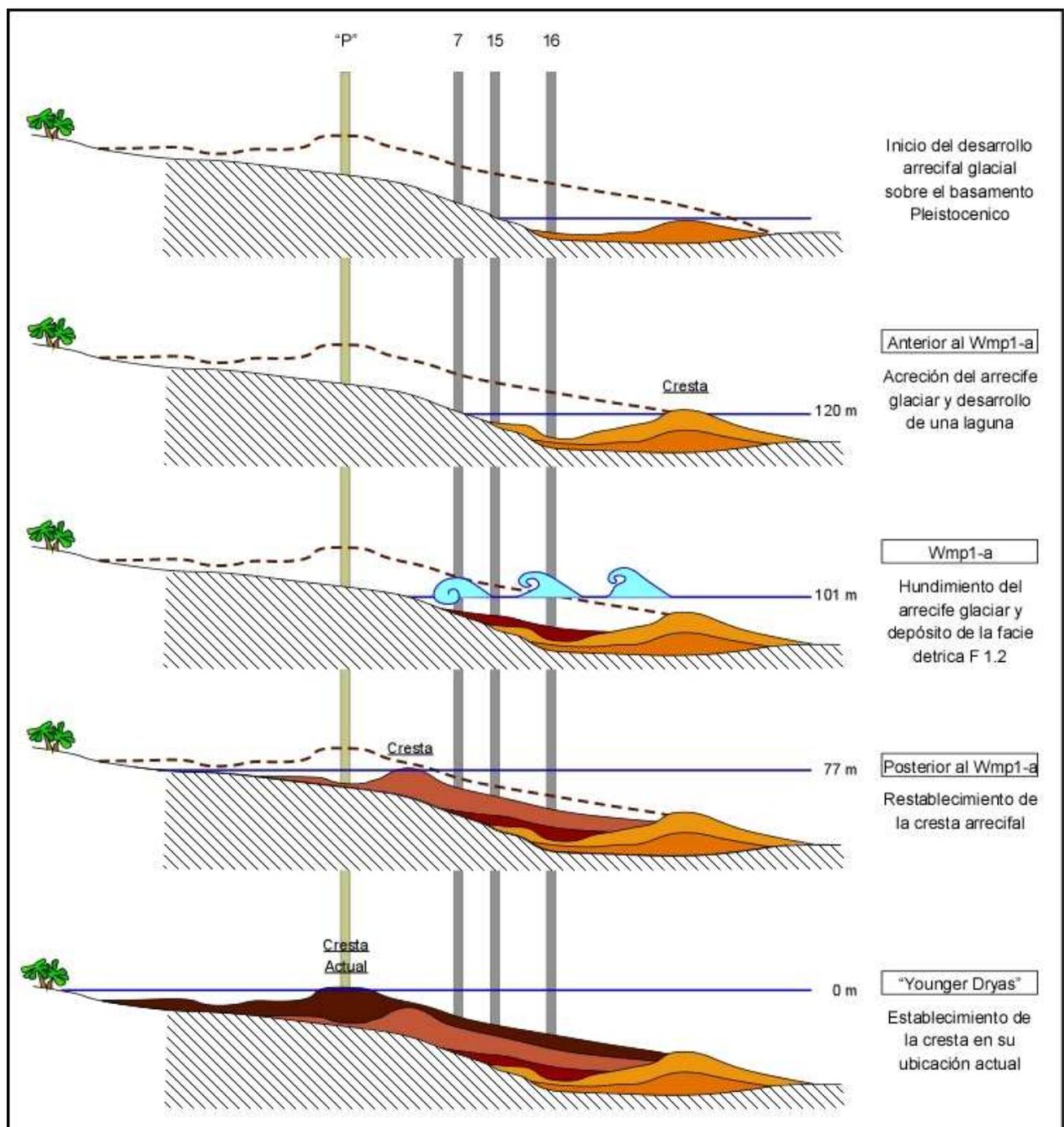


Figura 27. Historia del desarrollo arrecifal en la parte sur de Tahití. Como punto de referencia se encuentra el perfil del arrecife actual, representado por una línea café discontinua. En amarillo y naranja se muestra el arrecife glacial antes del Mwp-1a. En color marrón se representa la facies 1.2 depositada durante el Mwp-1a. En rosa oscuro se encuentra el arrecife postglacial que se re-estableció al finalizar el Mwp-1a. En café oscuro se muestra el arrecife establecido en su posición actual, durante el evento del *Younger Dryas*.

A los 14.65 ka, ocurrió el Mwp-1a inundando el arrecife glacial y se estima que duro hasta los 14 ka. La edad a la que finalizó éste evento es un aproximado, ya que en Mara'a no perforaron el re-establecimiento de la nueva cresta posterior al Mwp-1a, se estimó teniendo en cuenta una edad de 13.93 ka en la base de los pozos perforados en Papeete y el cálculo de una edad aproximada de 14.1 ka (considerando una tasa máxima de acreción de 14 mm/año), para la base de la secuencia de *Acropora* ramificadas robustas del pozo RGF-12 de Barbados, que representa el restablecimiento de la cresta después del Mwp-1a.

Durante el periodo que abarcó el Mwp-1a, se depositó una facies detrítica transgresiva (subfacies 1.2) la cual estuvo presente en todos los sitios, indicando progradación conforme el nivel del mar fue aumentando. Así mismo, dentro del Mwp-1a se tuvo un estadio en que el aumento del nivel del mar disminuyó su potencia y permitió el establecimiento de colonias, tanto en la parte somera a la que corresponden las colonias de borde arrecifal (facies 1.1), desarrolladas en los sitios 7 y 17, como en aguas profundas, con el desarrollo de colonias de *Porites* masivos (facies 3) en los sitios 16 y 18. Los corales establecidos durante la irregularidad del Mwp-1a, fueron incapaces de mantener su crecimiento debido al rápido aumento en el nivel del mar, que siguió al corto estadio que les había permitido desarrollarse.

Al finalizar el Mwp-1a, se observó en todos los sitios, ensambles de aguas profundas. Alrededor de los 13 ka los sitios 7, 5 y 17 desarrollaron la facies 2.2, y poco antes de los 13.56 ka los sitios 15, 18 y 16 iniciaron con la facies 2.3.

Posterior al establecimiento de colonias de coral de aguas profundas, en todos los sitios se observó una tendencia a la formación de ensambles coralinos de aguas de menor profundidad, poco antes de los 12 ka. En los sitios 7, 5 y 17 se encontró la facies 2.1, compuesta principalmente por colonias de ramificados robustos de *Acropora*; el sitio 15, considerado como una zona de transición, indica una variación lateral entre la facies 2.1 (pozo 15A) de *Acroporas* robustas y la facies 2.2 (pozo 15B) compuesta por placas de *Acropora* y finalmente en los sitios 18 y 16 se observó la facies 3 de colonias masivas de *Porites lobata*.

Seguido del desarrollo coralino de menor profundidad, nuevamente se depositan ensambles de aguas profundas en los sitios 7, 5, 17 y 15A (facies 2.2) y en los sitios 15B, 18 y 16 (facies 2.3). Hasta que alrededor de los 11 ka, aumenta aún más el tirante de agua y se observa en todos los sitios, el cambio a un ensamble coralino dominado por corales en forma de hoja (facies 4).

Finalmente, alrededor de los 9 ka se registró el último conjunto coralino (facies 5), depositado en el arrecife exterior inferior, con su máximo espesor en los pozos perforados a menor profundidad hasta desaparecer en el sitio 16, el sitio con mayor profundidad de todos.

3.6 CORRELACIÓN DE MARA´A CON OTROS SITIOS EN TAHITÍ

Con la finalidad de corroborar la historia arrecifal propuesta, se compararon los resultados obtenidos en Mara´a con los análisis breves realizados en la parte Norte de Tahití, llamada Tiarei y resultados previos de los núcleos “P” provenientes de la parte Oeste en el puerto de Papeete.

3.6.1 TIAREI

Se observó que los datos reportados por Camoin *et al.*, 2012, en Tiarei, siguen un patrón muy similar al que muestra Mara´a. Los pozos del “Borde Exterior” muestran el establecimiento de un arrecife bordeante, seguido de facies lagunares, considerándose análogos a los sitios 16 y 18 de Mara´a.

Se tuvieron que analizar los primeros metros del pozo 23A (Fig. 28), ya que la falta de fechamientos en las primeras facies dentro de los sitios 7, 5 y 17 en Mara´a, produce incertidumbre con respecto a los procesos y la temporalidad del Mwp-1a. El basamento del pozo 23A se encuentra a profundidades similares de los sitios 5 y 17 y cuenta con suficientes fechamientos $^{230}\text{U}/\text{Th}$, por lo que es posible establecer una temporalidad en Mara´a, mediante una comparación con éste pozo.

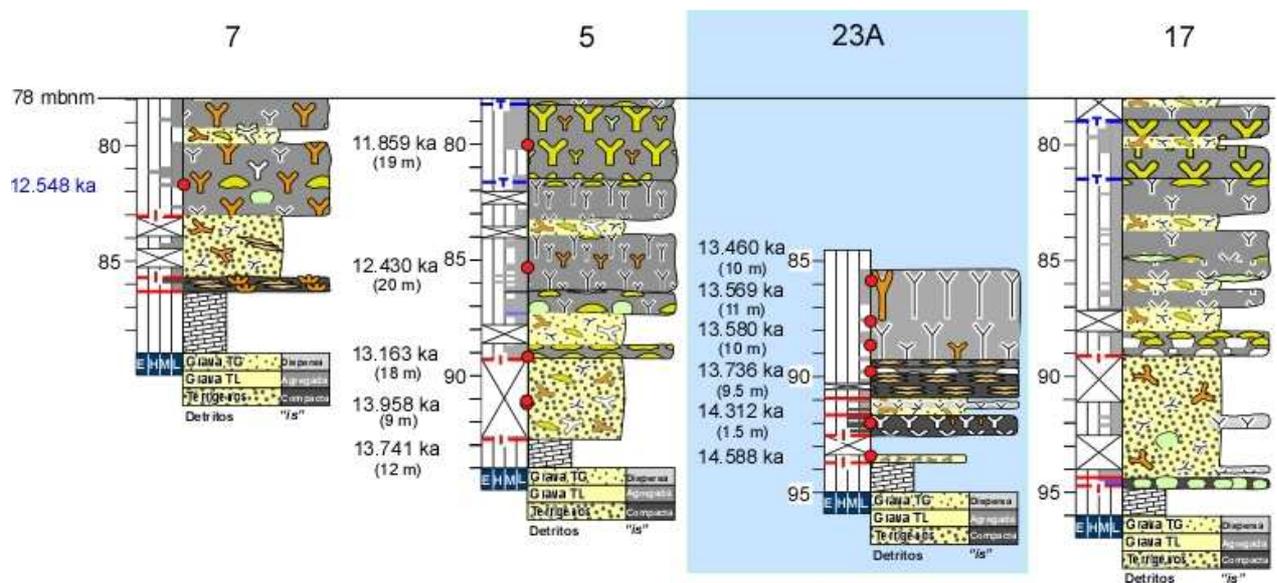


Figura 28. Sobre un recuadro azul claro se muestra el pozo 23A de Tiarei en relación con los sitios 7, 5 y 15 de Mara'a. En los sitios 5, 23A y 17 se observan profundidades muy similares del basamento Pleistocénico. Con letras negras se indican las edades U/Th, y debajo de ellas y entre paréntesis se muestra la profundidad ambiental a la que corresponde la colonia fechada.

La descripción del pozo 23A es la siguiente. En contacto con el basamento Pleistocénico, a 93.7 mbnm, se tiene un depósito detrítico, seguido de un vacío en la recuperación de 1 m. Posteriormente entre 92.5 y 91.5 mbnm, se presenta un arrecife bordeante con una profundidad ambiental de 1.5 m, identificado como zona de alta energía conformado por colonias de coral del género *Pocillopora* y por *Porites* ramificados robustos, acompañados de un cCA predominantemente moderado con verméticos. A los 91.6 mbnm éste arrecife bordeante es cubierto por un flujo detrítico, en el cual se desarrollan colonias esporádicas de corales encostrantes sobre los clastos; posteriormente se establecen colonias encostrantes de biofábrica densa cubierta por un cCA delgado, sin presencia de verméticos, con una profundidad ambiental de aproximadamente 9.5 m. Sobreyaciendo a éste ensamble coralino, encontramos ramificados delgados largos de *Porites* y ramificados robustos de *Pocillopora*, a con una profundidad ambiental de entre 10 y 11 m.

Con base en la descripción del pozo 23A, se identifico que el análogo a la facies de arrecife bordeante del sitio 17, es el establecimiento coralino ubicado entre 92.5 y 91.5 mbnm, datado en 14.312 ka. Éste arrecife bordeante en el pozo 23A no continuó su desarrollo, ya que fue sepultado por un aporte detrítico. Posterior a la facies detrítica, se desarrollo un ensamble arrecifal de mayor profundidad, depositado poco antes de los 13.74 ka.

En el sitio 23A, se observa el mismo patrón de desarrollo que en el sitio 17: el establecimiento de un arrecife bordeante sepultado por un aporte detrítico ocasionado por el Mwp-1a, que impidió el desarrollo arrecifal, sobre yacido por el establecimiento de colonias de mayor profundidad. Tomando en cuenta una diferencia de profundidad en el basamento Pleistocénico de apenas 1.1 m entre los pozos 23A y 17, se puede deducir que la edad para el arrecife bordeante en el sitio 17 es muy cercana o igual a la datación de 14.312 ka en el pozo 23A.

3.6.2 NÚCLEOS “P” DE PAPEETE

Papeete representa el desarrollo arrecifal posterior al Mwp-1a, la cresta arrecifal no fue perforada, en su lugar se perforaron facies lagunares representadas por corales de *Porites* ramificados en los pozos P9 y P10 y colonias de *Porites* masivos en los pozos P7 y P8. Las facies al inicio de los núcleos muy probablemente pertenezcan a la zona del arrecife anterior, que posteriormente desarrolló un ambiente lagunar, lo cual implica que el inicio de la cresta se ubica en la parte frontal de la cresta actual. Relacionando Mara’a y Papeete, el inicio de la cresta arrecifal se ubicaría en algún lugar entre los núcleos “P” y el sitio 7.

El dato de mayor importancia en Papeete, con relación a los pozos de Mara’a, es la respuesta del arrecife a una edad de ~12.3 ka cuando ocurrió un estadio bajo del nivel del mar (Fig. 29). En los datos reportados por Montaggioni (1988) y Montaggioni *et al.*, (1997) se observa un cambio de facies en la secuencia de Papeete, de un ambiente lagunar a un ambiente de cresta representado por corales ramificados robustos de *Acropora*. Lo anterior indica que a los ~12.3 ka, la cresta se estableció en su posición actual.

PAPEETE

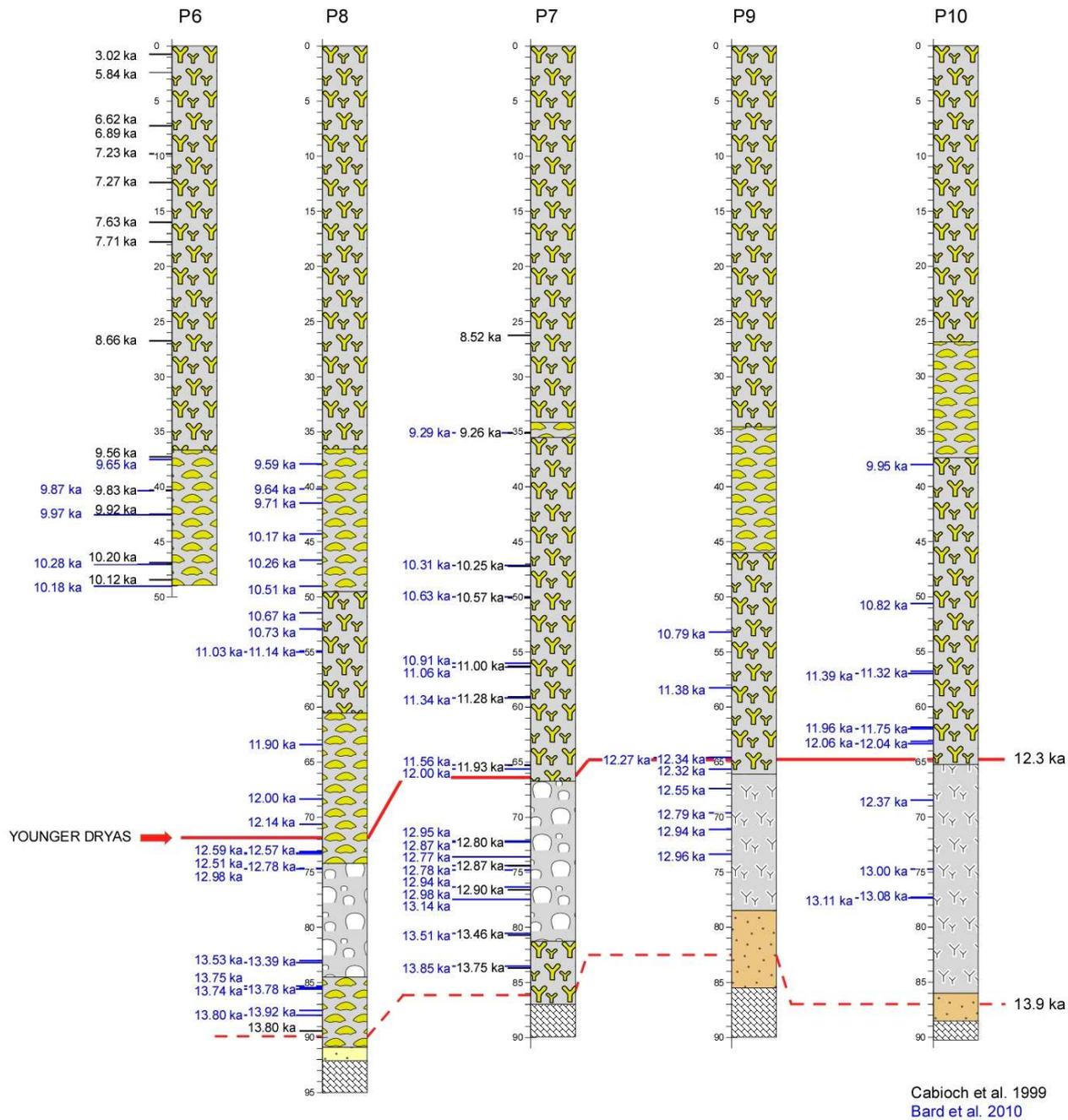


Figura 29. Núcleos “P” modificado de Cabiocch *et al.*, 1999. En el costado izquierdo de cada pozo se muestran las edades ²³⁰U/Th, valores reportado por Cabiocch *et al.*, 1999 en negro y valores reportados por Bard *et al.*, 2010 en azul. En una línea roja continua se indica la edad de los 12.3 ka y el evento del *Younger Dryas*, y en una línea roja discontinua la edad de los 13.9 ka.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La caracterización de los núcleos muestra un sistema arrecifal glacial similar al actual, compuesto por una cresta, que no fue perforada por el IODP, una laguna (sitio 16B) y un arrecife bordeante (sitios 15, 18 y 16). Éste sistema arrecifal glacial fue ahogado a los 14.65 ka por el pulso de agua Mwp-1a. El inicio del Mwp-1a se da a una profundidad de 108.9 mbnm en el pozo 15A donde se registra la última colonia del arrecife bordeante (facies 1.1), que corresponde a un coral tabular de *Acropora* fechado en 14.65 ka. Desde el inicio, hasta el término del Mwp-1a se depositó una facies detrítica (facies 1.2) indicativa de un elevado flujo de sedimentos durante éste periodo. Dicho flujo de sedimentos, en conjunto con el aumento rápido del nivel del mar, inhibieron el crecimiento coralino.

Desde la identificación del Mwp-1a hasta la fecha, se le ha considerado como un evento ininterrumpido (Fairbanks, 1989, Deschamps *et al.*, 2012). Sin embargo, los datos obtenidos en el presente estudio indican que el Mwp-1a no fue un pulso constante, y que el aumento en nivel del mar fue irregular poco antes de los 14.3 ka, donde se identificó el desarrollo momentáneo de un arrecife bordeante (facies 1.1), que fue ahogado rápidamente. El valor de 14.3 ka para la facies 1.1 en el sitio 17 de Mara'a, fue estimado por comparación con los datos del pozo 23A en Tiarei ("Cresta Interna", Camoin *et al.*, 2012), que al igual que el sitio 17 presenta un desarrollo breve de un arrecife bordeante, que fue hundido al poco tiempo de su establecimiento.

En los sitios 16 y 18, se presenta el desarrollo de la facies 3, interpretadas como colonias de corales masivos de *Porites*, que lograron su crecimiento aún en aguas profundas durante el Mwp-1a. Estos *Porites* masivos lograron acrecionar, al igual que el arrecife bordeante en el sitio 17, debido a la irregularidad en el aumento del nivel del mar durante el Mwp-1a a los 14.3 ka. Se observa que en el pozo 16B lograron alcanzar bajas profundidades, ya que desarrollaron un cCA moderado con presencia de verméticos. La estimación de 14.3 ka para la facies 3, es con relación al sitio 18 (14.27 y 14.32 ka). El desarrollo de ambos ensambles arrecifales, tanto en el sitio 17 (facies 1.1) como en el los sitios 18 y 16 (facies 3), se trunca cuando la desaceleración breve en el aumento del nivel del mar durante el Mwp-1a termina y nuevamente aumenta su velocidad.

Para determinar el tiempo y la duración específica de esta irregularidad dentro del Mwp-1a se requieren fechamientos en los pozos de Mara'a y un re-análisis completo de los pozos en Tiarei. Aunque se estima que ocurrió alrededor de los 14.3 ka, con base en el establecimiento de la facies de arrecife bordeante a los 14.312 ka en el pozo 23A de Tiarei, y que su duración debió

haber sido corta, ya que solo se depositaron espesores delgados para estas facies, tanto en Mara'a (0.5 m) como en Tiarei (1 m). Se logra identificar el ahogamiento del arrecife bordeante (facies 1.1) en el sitio 17, por el depósito de la facies detrítica 1.2, que cubre a la facies 1.1 y por la diferencia en profundidades ambientales entre la facies 1.1, que se desarrolla de 0 a 5 m de profundidad y la facies 2.2 que va de 15 a 25 m, misma que se deposita posterior a la facies detrítica 1.2.

Para dar seguimiento al ahogamiento del arrecife bordeante (facies 1.1) en el sitio 17 a través del sitio 5, se tiene como limitante la falta de recuperación. La facies 1.1 tiene como característica una biofabrica densa (que inclusive se ha llegado a confundir con el basamento Pleistocénico, Camoin *et al.*, 2007), conllevando a una recuperación en todos los demás sitios, inclusive aquellos que al igual que el sitio 5 mostraron problemas con la perforación (Inwood *et al.*, 2008). Debido a lo anterior, se pone en duda que la recuperación de ésta facies haya fallado en específico para el sitio 5, por lo que se considera que ésta falta de recuperación fue debida a los materiales no consolidados de la facies detrítica (facies 1.2). Con los argumentos anteriores se establece el depósito de la facies 1.2 en la base del núcleo 15.

Posterior al ahogamiento del arrecife bordeante en el sitio 17, 8.3 m después ocurre otro establecimiento coralino en el sitio 7 (facies 1.1). Se plantea la posibilidad de que éste arrecife bordeante, represente el inicio del establecimiento de la nueva cresta pendiente arriba, debido a que la profundidad del basamento Pleistocénico, es similar a la que presentan los núcleos "P" en Papeete, los cuales pertenecen a la cresta actual. Hacen falta obtener fechamientos de la facies 1.1 en el sitio 7 para comprobar ésta hipótesis.

Se propone una edad aproximada de 14 ka para el final del Mwp-1a, con base en los núcleos "P" de Papeete (13.92 ka), y con base en la edad calculada para la base del núcleo RGF-12 de Barbados de 14 ka, que es concordante con la reportada por Liu y Millman (2004). A su vez ésta edad concuerda con el establecimiento de las facies de aguas profundas depositadas en Mara'a después del Mwp-1a, las cuales son más jóvenes que 14 ka (12.548 ka en el sitio 7 y 13.559 ka en el sitio 15), es decir su desarrollo tuvo lugar una vez finalizado el Mwp-1a.

Al terminar el evento del Mwp-1a, el desarrollo arrecifal fue continuo y se depositaron espesores potentes, que fueron de ensambles coralinos profundos en su inicio, a ensambles de menor profundidad a una edad de ~12.3 ka. El desarrollo de conjuntos coralinos de menor profundidad, fue coincidente con el evento del *Younger Dryas*.

Seguido al estadio bajo en el nivel del mar, contrario a lo que sucede en Papeete, los pozos de Mara'a por haber sido perforados a mayor profundidad y tener ensambles arrecifales profundos, no lograron mantener su crecimiento con el aumento en el nivel del mar y se registró un cambio entre subfacies, de la subfacies 2.1 de menor profundidad a la subfacies 2.2 de mayor profundidad. Estos ensambles profundos, correspondientes a la facies 2, continuaron su crecimiento hasta que a los 11 ka se presentó el Mwp-1b y desplazó la facies de corales ramificados por un conjunto coralino dominado por corales en hoja (facies 4). Hasta que finalmente se desarrolla la facies 5 de corales encostrantes en hoja, masivos y tabulares.

4.1.1 LÍMITES EN LA INTERPRETACIÓN

Debido a que los Mwp son identificados con base en la última y la primer colonia *in situ* de aguas someras (0 a 5 m), la identificación de colonias *in situ* y de clastos se vuelve primordial durante éste trabajo. La baja recuperación en los pozos afecta la clasificación de los corales, principalmente en la facies 1, debido a la falta de biolita que proporciona soporte a la perforación. A causa de esta pobre recuperación, es complicado tener una definición certera de los límites entre las facies y ubicar los eventos en el tiempo, en especial para las subfacies 1.1, 1.2 y 1.3.

La clasificación de las *Acropora* tabulares en el pozo 15A, ubicadas a 50 cm del núcleo 36R-1 datada en 14.5 ka y a 5 cm del núcleo 36R-CC datada en 14.41 ka, son de suma importancia ya que corresponden a la secuencia con la cual se identificó el inicio del Mwp-1a. Dichas colonias de *Acropora* fueron clasificadas como clastos y por lo tanto el Mwp-1a dio inicio antes de los 14.5 ka o de los 14.41 ka. Cabe la posibilidad de que éstos corales se encuentren *in situ* y que por lo tanto formen parte de la facies 1.1, ya que muestran características de una colonia *in situ*, como lo es su orientación en posición ascendente y el cCA encostrante en la cima. Pero en oposición a estas características, se tiene que son corales trancos, es decir, no se recuperó la base y por lo tanto no se puede observar el cCA en su parte inferior, una base encostrante en caso de tenerla y las proporciones y condiciones del coral por completo; así como tampoco se puede analizar la relación mutua con otras colonias, al no tener corales próximos con los cuales relacionarlos.

Adicionalmente se observa a 24.5 cm en el núcleo 37R-1 del pozo 15A, lo que se interpreta como el contacto directo de la facies 1.1 con la facies 1.2, donde ambas facies muestran por completo sus características distintivas. Bajo estas circunstancias las *Acroporas* de 14.5 y 14.41 ka

que se encuentran posterior a éste contacto directo no formarían parte de la facies 1.1. Aunque nuevamente, la incertidumbre con respecto a la facies 1.2 en contacto directo con la facies 1.1, es la falta de recuperación en los núcleos subsecuentes.

Pero por último se tiene, que aunque la última colonia *in situ* que conforma la facies 1.1 es una *Acropora* tabular al igual que los corales de los que se discute, las *Acroporas* de 14.5 y 14.41 ka se encuentran a un metro de distancia de la subfacies 1.1. Si las *Acroporas* de 14.5 y 14.41 ka fuesen aceptadas como colonias *in situ* se tendría un espesor final para la subfacies 1.1 de 1.8 m en comparación con un rango de 0.2 a 0.6 m que se observa en todos los demás sitios para ésta subfacies, inclusive en el pozo gemelo 15B la facies 1.1 muestra un espesor de 0.2 m. Si se consideraran dichos corales de *Acropora* como corales *in situ* y como componentes de la facies 1.1, los 1.8 m de espesor en la facies 1.1 quedarían conformados inicialmente por 0.2 m de facies 1.1 debidamente clasificada, seguida por 1 m de no recuperación y finalmente 0.6 m correspondientes a las colonias de *Acropora* tabulares de 14.5 y 14.41 ka, de las cuales no se tiene la seguridad de que se encuentren *in situ*. Aunque se reportaron dificultades en la perforación de los núcleos en este sitio (Inwood *et al.*, 2008), un metro de no recuperación en una facies de biofabrica densa como lo es la facies 1.1 sería cuestionable.

Los pozos 16 y 18 muestran el mismo problema de baja recuperación y esto afecta la descripción e interpretación de la facies 3. En este caso se procuró realizar la identificación de la facies y sus límites de una manera conservadora, respetando los espacios de no recuperación. En cuanto a la delimitación de eventos en estas facies, se necesitan más fechamientos.

La falta de edades $^{230}\text{U}/\text{Th}$, que den continuidad a la identificación de eventos, es una limitante importante. El termino del Mwp-1a y su irregularidad (sitios 7, 5 y 17), tuvieron que ser estimados con base en núcleos perforados en otras localidades (Papeete y Tiarei), por lo que únicamente se logró proporcionar un valor aproximado.

5.1.2 COMPARACIÓN CON TRABAJOS PREVIOS

Los resultados obtenidos en el presente estudio se compararon con publicaciones previas, realizadas también con base en los núcleos del IODP-310. Los trabajos base son los de Abbey *et al.*, (2011), quienes presentan conjuntos coralino-algales y los de Seard *et al.*, (2011), que estudiaron el desarrollo de la biolita. Sustentándose en las descripciones de ensamblajes arrecifales

que realizan dichos autores, se llevaron a cabo publicaciones posteriores (Camoin *et al.*, 2012; Deschamps *et al.*, 2012), donde se estudian los Mwp, el cambio climático y la respuesta del desarrollo arrecifal.

Al observar los conjuntos arrecifales propuestos por Abbey *et al.*, (2011) y Seard *et al.*, (2011), se identificaron diferencias, las más relevantes son enumeradas a continuación. Cada punto tiene su ejemplificación en la Fig. 30 mediante un círculo negro, que contiene el número que le corresponde en el listado.

Identificación de clastos.

1.- En el sitio 15, entre el ensamble arrecifal de la facies 2.3, se reconocieron clastos con espesores moderados de cCA, en ocasiones acompañados por vermétidos. Ya que éstos clastos no componen el ensamble arrecifal primario, sus características (cCA y vermétidos) no fueron tomadas en cuenta durante la identificación de la paleoprofundidad. La misma diferencia se puede observar en el sitio 18, para la facies 5/ensamble coralino cA7.

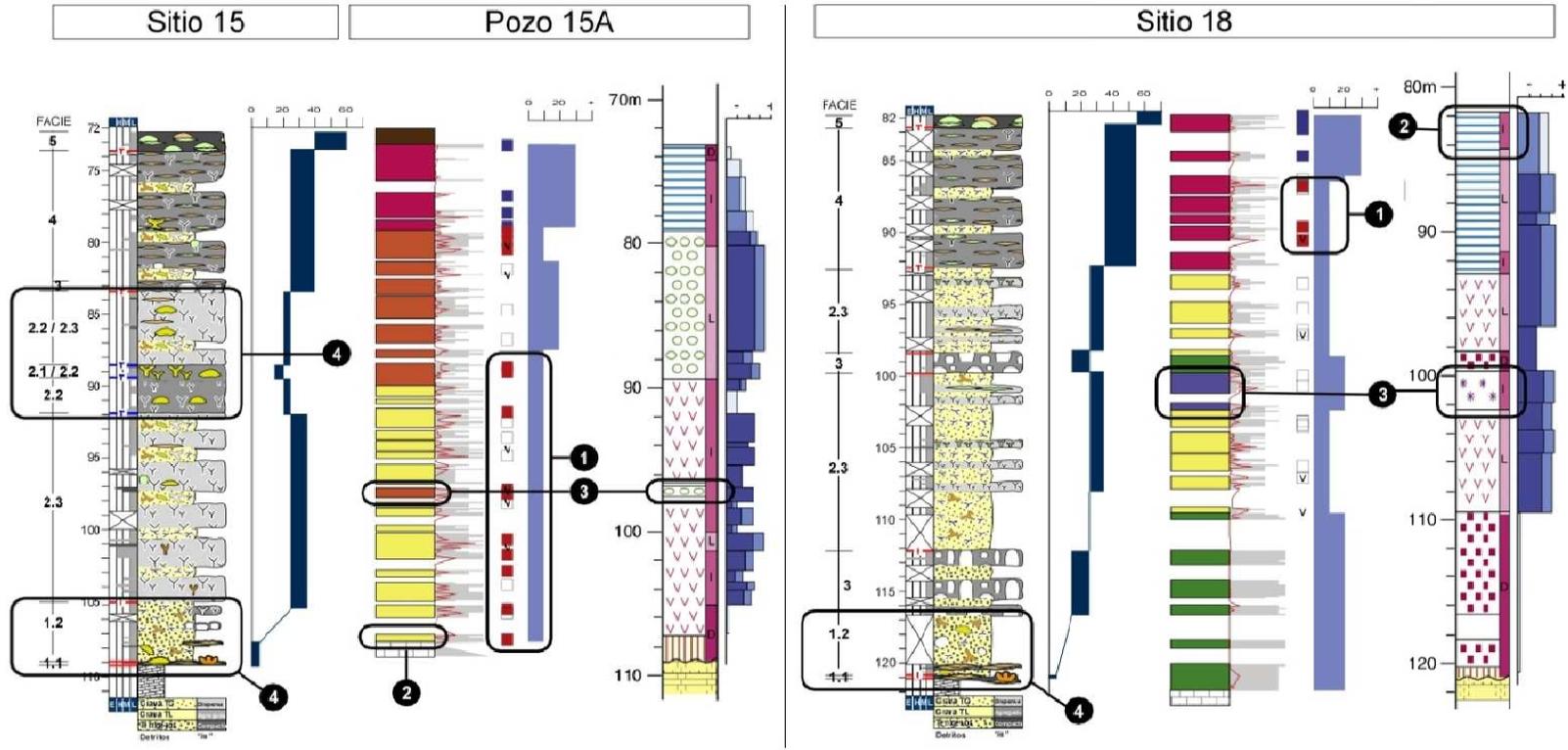
Uso de la biofabrica en la identificación de cambios en el contexto coralino.

2.- Aunque la biofabrica fue de gran utilidad en la identificación de diversas facies, la aplicación más relevante fue en el reconocimiento de la subfacies 1.1

Representatividad de facies y subfacies.

Al realizar resúmenes entre los pozos más próximos (ej. Sitio 15) y un proceso de correlación entre sitios (ej. Pozo 18), se obtuvo una identificación y delimitación consistente de las facies. Logrando:

- 3.- Discriminación de elementos que no conformaban facies independientes.
- 4.- Distinción de facies difíciles de identificar. Delimitación e identificación de la facies 2.2 y 2.1 en el pozo 15A y en ambos ejemplos, las facies 1.2 y 1.1.



Estudio presente.

Abbey et al 2011

Seard et al 2011

- F 5 Encostrantes compactos
- F 4 Corales de hoja
- F 3 Parches de *Porites* masivos
- F 2.3 Ramificados delgados de *Porites*
- F 2.2 Placas de *Acropora* y ramificados
- F 2.1 Ramificados robustos de *Acropora* y otros ramificados.
- F 1.3 *Porites* masivos sin biolita
- F 1.2 Detritos con colonias mixtas ocasionales
- F 1.1 Encostrantes compactos con matriz arenosa

- cA7, *Pachyseris speciosa*, *Leptoseris solida* y *Montipora* encostrantes. Alga coralina encostrante delgada.
- cA6, Corales encostrantes y ramificados. Alga coralina encostrante delgada y gruesa.
- cA5, Corales encostrantes, ramificados y tabulares. Alga coralina encostrante delgada y gruesa.
- cA4, *Acropora* ramificada robusta.
- cA3, *Porites* ramificado y *Pocillopora* robusta. Alga coralina encostrante gruesa.
- cA2, *Porites* masivo. Alga coralina encostrante delgada.
- cA1, *Porites* masivo. Alga coralina encostrante delgada.

- Ensamblajes algales coralinos
- aA4, *Mesophyllum tunafutiense* interdesarrollados con corales laminares, espesores delgados de *Lithoporella melobesioides*.
 - aA3, *Mesophyllum erubescens*, *Lithophyllum prototypum* y *Lithothamnion prolifer* nudosos.
 - aA1, encostrantes espesos de *Hydrolithon onkodes*
 - aA2, encostrantes espesos de *Hydrolithon onkodes* con *H. gardineri*, *H. munitum*, *H. reinboldi* y *Pnencophyllum conicum*.

- Agaricias encostrantes y *Favidos* (PP)
- Porites* ramificado y encostrante *Montipora* (PP)
- Porites* masivo (PP)
- Porites* ramificado/*Pocillopora* (PP)
- Acropora* Tabular (tA)
- Acropora* ramificada robusta (RbA)
- Arena terrigena
- Debri de corales y arenas
- Pocillopora* ramificada robusta *Montipora* masiva (RbA)

Figura 30. Diferencias del presente trabajo con respecto a los trabajos de Abbey et al., 2011 y Seard et al., 2011. Para ambos ejemplos (sitio 15 y pozo 18) de izquierda a derecha el primer ejemplo corresponde a los resultados aquí reportados, seguidos por los de Abbey et al., 2011 y por último los de Seard et al., 2011.

De lo anterior se denota que, para la definición de los elementos que integran el ensamble arrecifal, es necesario tomar en cuenta la mayor cantidad de factores que influyen en el depósito y sus componentes. Un aspecto importante a considerar, es que el traslado de fragmentos de coral vivo o muerto, no se encuentra restringido únicamente a eventos poco comunes de tormentas, más bien el transporte de fragmentos fuera del arrecife, ocurre continuamente y es un componente importante en la formación de facies, el crecimiento y la extensión del arrecife, aún en la ausencia de huracanes de gran intensidad (Hughes *et al.*, 1999).

En el uso del cCA como paleoindicador del nivel del mar, se debe tomar en cuenta la condición topográfica del lugar que se está analizando. El ámbito de crecimiento del cCA no puede ser utilizado directamente para identificar paleoprofundidades, éste debe de ser empleado con cautela (Adey y Macintyre, 1973), ya que en un sitio en donde la pendiente es abrupta, el movimiento de los fragmentos es predominantemente hacia el océano (Harmelin-Vivien y Laboute, 1986) y un área con pendiente elevada (sitio 16) tendrá aporte de clastos cubiertos por cCA provenientes de profundidades someras.

Por otro lado, Abbey *et al.*, (2011) propusieron periodos largos de estabilidad paleoambiental, mediante el ensamble coralino CA3 en Tiarei (<12.5 ka). Aunque los núcleos perforados a grandes profundidades (sitios 16 y 18) presentan baja diversidad en el ensamble coralino, y por lo tanto facies potentes y continuas, los resultados aquí obtenidos muestran variación a causa del *Younger Dryas* a los ~12.3 ka.

En cuanto a la colonización del sustrato Pleistocénico, Abbey *et al.*, (2011) reportan dos tipos de ensambles al inicio de la secuencia: el cA2 y cA3, interpretados como una discrepancia de 5 a 10 m de paleoprofundidad, donde la iniciación del arrecife postglacial se desarrolló rápidamente en los lugares someros (Tiarei y Mara'a), mientras que tuvo un retraso en aguas más profundas (Mara'a). En el presente trabajo, la facies 1.1 se registró en todos los sitios donde se desarrolló el arrecife postglacial, indicando uniformidad en la colonización del sustrato.

Otra observación es el decremento en la riqueza de especies, posiblemente debido al aumento de precipitación pluvial (17 ka - 11 ka) que provocó reducción en la salinidad y aumento

en la turbiedad. Éste fue seguido de una mejora en la calidad del agua (12.5 ka - 0 ka), identificada mediante el aumento en la riqueza coralina y la presencia de *Acropora* (Abbey *et al.*, 2011). Nuestros datos indican un decremento en la riqueza de especies debido al Mwp-1a (14.65-14.3 ka), ya que posterior a éste evento, se establecieron ensamblajes coralinos profundos de menor diversidad. La presencia del coral *Acropora* fue a consecuencia del evento del *Younger Dryas* donde se presenta un estadio bajo en el nivel del mar, propiciando el desarrollo de las colonias de *Acropora* en 9 de los 11 pozos perforados en Mara´a.

Finalmente Camoin *et al.*, (2007), Abbey *et al.*, (2011) y Deschamps *et al.*, (2012), concluyen que el desarrollo arrecifal fue continuo desde los 16 ka a los 8 ka, presentando cambios en los conjuntos coralinos, debidos a variaciones en los parámetros ambientales (profundidad del agua y energía, condiciones de luz, flujos terrígenos, concentración de nutrientes, etc.). En contraste, en el presente estudio, se observa la interrupción del desarrollo coralino, debido a el ahogamiento del arrecife glacial por causa del Mwp-1a y el efecto de una irregularidad en éste evento a la mitad de su duración; la variación en el crecimiento arrecifal, debido al efecto del estadio bajo durante el *Younger Dryas* y finalmente el cambio en la dominancia coralina marcada por el Mwp-1b.

La identificación de los eventos que influyeron en la estrategia desarrollo arrecifal, es complicada si se basa exclusivamente en la identificación de conjuntos coralinos-algales. La reconstrucción del pasado requiere de trabajos complejos, que incluyan la mayor cantidad de factores posibles, especialmente en el Indo Pacífico donde la diversidad de corales es muy alta, 1,400 especies en comparación con las 70 que se encuentran en el Atlántico-Caribe (Veron, 2000). Adicionalmente en el Pacífico no existen especies de coral que sean indicativas del nivel del mar (Davies y Montaggioni, 1985 y Done, 1983), a diferencia del Atlántico, en donde por ejemplo el coral *Acropora palmata* generalmente se distribuye a profundidades menores a 10 m (Blanchon y Shaw, 1995). Por lo tanto, se debe de evitar realizar análisis en los que se tome de manera independiente, los elementos que conforman el desarrollo arrecifal.

Deschamps y colaboradores (2012) conjuntaron los datos de Mara´a y Tiarei y definieron el Mwp-1a (14.65-14 ka), mediante la identificación de conjuntos coralinos correspondientes a profundidades menores de 10 m (conjunto coralino "PM"). El inicio del Mwp-1a lo establecen en el núcleo 15A en Mara´a (14.65 ka) y el final en el núcleo 23A (14.3 ka). Aunque el sitio 7 de Mara´a también muestra el conjunto coralino "PM" (Facies 1.1), no fue tomado en cuenta para el establecimiento del Mwp-1a, ya que en su lugar se le dio importancia a las estructuras geológicas

formadas por paleocrestas en Tiarei. Se omitió el hecho de que Mara´a representa un transecto prácticamente continuo, desde su sitio más profundo (sitio 16) hasta el más somero (sitio 7) y que por ser una zona de alta energía, cuenta con facies de gran diversidad, las cuales son de gran ayuda en la identificación de variaciones dentro del desarrollo coralino. En cambio, la zona de Tiarei es de baja energía y sus pozos fueron perforados a mayor profundidad que los perforados en Mara´a, por lo que predominan ensamblajes coralinos de mayor profundidad y menor diversidad; adicionalmente, los sitios se ubican concentrados en la cresta exterior e interior. Deschamps *et al.*, (2012) consideraron que las paleocrestas de Tiarei eran las características que les permitirían documentar de manera precisa el Mwp-1a, por lo que la historia se explica únicamente hasta la “Cresta Interior”, ya que el resto se encuentra registrada en los sitios 7 y 5, que fueron omitidos.

Adicionalmente, Camoin *et al.* (2012) describe las paleo-crestas observadas en Tiarei como “Cresta Externa” y “Cresta Interna” y mencionan que éstas características geomorfológicas, aparentemente son relativas a condiciones topográficas locales del substrato Pleistocénico. Los resultados del presente estudio indican, que el arrecife bordeante del sitio 23A en Tiarei (“Cresta Interna”) es análogo con el arrecife bordeante del sitio 17 en Mara´a y que ambos arrecifes bordeantes fueron desarrollados durante la irregularidad del Mwp-1a (-14.3 ka). Se deduce que la geomorfología observada en la parte Norte de Tahití (“Cresta Externa” correspondiente al arrecife glaciar y “Cresta Interna” desarrollada durante la irregularidad del Mwp-1a) fue conservada debido a las pobres corrientes marinas de ésta zona (Ver Fig. 3), que produjeron menor erosión en comparación con la zona Sur de Tahití. Debido a lo anterior las paleo-crestas observadas en Tiarei, no se observan en Mara´a.

4.2 CONCLUSIONES

Se obtuvieron cinco facies y seis subfacies. La facies 1 se caracterizó por su matriz arenosa y por su biolita escasa y/o nula, se compone por un ensamble arrecifal multimórfico encostrante (subfacies 1.1), una facies detrítica (subfacies 1.2) y una biofabrica agregada de Porites masivos (subfacies 1.3). Posteriormente se presentó una dominancia de corales ramificados, correspondientes a la facies 2, que comprende las subfacies 2.1, 2.2 y 2.3, conformados por *Acropora* ramificada robusta y otros ramificados, placas de *Acropora* y ramificados, y ramificados delgados de *Porites* respectivamente. A partir de la facies 2 la biolita es bien desarrollada y da soporte al ensamble arrecifal. Distribuida a manera de parches en todos los sitios (a excepción del 17), y de manera continua en los sitios 16 y 18, se observa la facies 3 de corales masivos de *Porites lobata*, que se distingue de la subfacies 1.3 por el desarrollo biolita. Reemplazando a la facies 2 se desarrolla la facies 4, con dominancia de corales en forma de hoja, que posteriormente da lugar a la facies 5 de ensamble arrecifal compacto encostrante. Ésta última facies al igual que la facies 1 presentó biolita escasa y/o nula.

Se observó correlación entre todas las facies identificadas, a excepción de la facies 3 cuando se presenta a manera de parches y la subfacies 1.3, debido a la geomorfología del arrecife glacial. La correlación entre las subfacies que conforman la facies 1, 2 y 3, es variable. Ésta diferencia está dada de Oeste a Este, de menor a mayor profundidad y de menor a mayor pendiente. En cambio las facies 4 y 5 se correlacionaron en todos los pozos. De igual manera la subfacies detrítica 1.2 se correlacionó a través de todos los sitios, debido a su carácter transgresivo.

Las biofacies se desarrollaron en dos zonas: arrecife anterior y exterior. La facies 1 depositada en el arrecife anterior, comprendió ámbitos que van de 0 a 5 m correspondientes a la subfacies 1.1 y de 5 a 10 m para la subfacies 1.3. Las facies que se desarrollaron en el arrecife exterior, mostraron profundidades ambientales variables de acuerdo a la ubicación y profundidad de los pozos. Las profundidades más someras, dentro del arrecife exterior, corresponden a la subfacies 2.1 (15 a 20 m) en el lado Oeste y a la facies 3 (15 a 25 m) en el Este. Enseguida se registra de 15 a 25 m la subfacies 2.2 en el Oeste y de 25 a 35 m la facies 2.3 en la parte Este. Por último, se registraron tanto en la parte Este como la Oeste, la facies 4, que va de 20 a 45 m, y la facies 5, de 30 a 50 m. Todas las facies observadas presentaron traslape y/o variaciones laterales con una o varias facies.

Con base en la cronoestratigrafía mostrada, se determinó que el arrecife glacial se hundió a los 14.65 ka cuando dio comienzo el Mwp-1a, que continuó hasta que a los ~14.3 ka presentó una irregularidad en su aumento en el nivel del mar, permitiendo el desarrollo breve de un arrecife bordeante. Se observó que este arrecife bordeante fue ahogado rápidamente, dejando un registro breve y que el Mwp-1a continuó hasta los 14 ka, fecha en la cresta se re-estableció pendiente arriba. Durante el evento del Mwp-1a, se identificó el depósito de la facies detrítica transgresiva 1.2. Al término del Mwp-1a se observa un desarrollo continuo de conjuntos arrecifales profundos, con variaciones en la composición coralina, debido a la profundidad y pendiente a la cual crecieron. A los ~12.3 ka, se identificó el establecimiento de colonias de coral de menor profundidad a las ya establecidas, como resultado del efecto del *Younger Dryas*. Durante el Mwp-1b (11 a 11.5 ka), cambió la configuración del arrecife, de estar dominado por corales ramificados a estarlo por corales en forma de hoja. Después de los 11 ka se registró un desarrollo continuo, hasta que el arrecife llegó a su parte más profunda, correspondiente a la facies 5.

Se reconoce el inicio del Mwp-1a a los 14.65 ka, pero contrario a lo que se ha reportado hasta el momento (Blanchon, 2011), los datos muestran que no fue un evento continuo. Poco antes de los ~14.3 ka, se observó una desaceleración en el aumento del nivel del mar, dando lugar a un breve episodio de establecimiento coralino, que fue ahogado rápidamente cuando el Mwp-1a recuperó su potencia inicial, hasta que finaliza a los 14 ka. En total, el Mwp-1a tuvo una duración de 650 años y provocó un aumento en el nivel del mar de aproximadamente 23.5 m. La segunda variación en el nivel del mar se establece a los ~12.3 ka, durante el *Younger Dryas*, que marca un estadio bajo, reflejado en el establecimiento de colonias de coral de menor profundidad. La tercera y última variación en el nivel del mar fue un aumento de los 11 a los 11.5 ka, cuando el Mwp-1b provocó un cambio en la dominancia de coralina. Aunque para estos dos últimos eventos no fue posible establecer la diferencia en metros en el nivel del mar, los datos que aquí se presentan son lo suficientemente robustos como para establecer su existencia y los efectos que tuvieron sobre el desarrollo arrecifal.

En contraste con otros trabajos publicados que utilizaron los núcleos del IODP-310, se observó un hiato en el depósito, posterior al ahogamiento arrecifal debido al Mwp-1a; una irregularidad a los ~14.3 ka en el Mwp-1a y la reanudación de éste evento, seguido por el hiato en el depósito, hasta finalizar a los ~14 ka. El principal problema en la falta de consenso para el evento del Mwp-1a, han sido las comparaciones entre los distintos episodios que conforman éste evento, como si fueran el mismo. Es decir, las características identificadas en el Pacífico (primer periodo de 14.65 a 14.3 ka) han sido comparadas con las identificadas en el Caribe (segundo

periodo de 14.3 a 14 ka). Otro aporte importante del presente estudio, es la identificación del efecto del *Younger Dryas* (12.3 ka) sobre el desarrollo arrecifal. Este efecto no había sido observado anteriormente y los resultados aquí reportados muestran el reemplazamiento de conjuntos coralinos profundos, por corales de menor profundidad en todos los sitios. A diferencia de lo que se ha publicado para la zona de Tahití, se rectifica la existencia del Mwp-1b, ya que se identificó un cambio en la dominancia de corales ramificados a corales en forma de hoja y ésta modificación en el ensamble arrecifal es contemporánea al tiempo en el que se reporta el Mwp-1b en otras regiones del Caribe.

El desarrollo arrecifal postglacial no fue continuo y se vio afectado directamente por los aumentos en el nivel del mar (Mwp 1a y 1b), así como también por los estadios bajos en el mismo (*Younger Dryas*). Lo anterior demuestra que dichos eventos fueron lo suficientemente pronunciados y, adicionalmente en el caso del Mwp-1a lo suficientemente duraderos como para dejar una huella continua en el registro fósil.

Debido a que los estudios acerca del nivel del mar y sus paleointerpretaciones son trabajos complejos, requieren de análisis que integren factores biológicos, estratigráficos, topográficos y geográficos. Por lo anterior, es importante que en trabajos futuros se apliquen y desarrollen metodologías que integren la mayor cantidad de datos posibles. En lo particular es necesario realizar estudios de zonación en el arrecife moderno de Tahití, para lograr un mayor entendimiento y una mejor interpretación de sus paleoarrecifes.

REFERENCIAS

- Abbey, E., Webster, J.M., Braga, J.C., Sugihara, K., Wallace, C., Iryu, Y., Potts, D., Done, T., Camoin, G., y Seard, C. (2011). Variation in deglacial corallgal assemblages and their paleoenvironmental significance: IODP Expedition 310, "Tahiti Sea Level. *Global and Planetary Change* 76 p. 1-15.
- Adey, W.H. y Macintyre, I.G., (1973). Crustose coralline algae: a re-evaluation in the geological sciences. *Geological Society Of America Bulletin*, 84(3) p.883-904.
- Adjeroud, M., (1997). Factors influencing spatial patterns on coral reefs around Moorea, French Polynesia. *Marine Ecology Progress Series*, 159(1) p.105-119.
- Adjeroud, M., Pratchett, M. S., Kospartov, M.C., Lejeusne, C., y Penin, L. (2007). Small-scale variability in the size structure of scleractinian corals around Moorea, French Polynesia: patterns across depths and locations. *Hydrobiologia* 589 p. 117-126.
- Bard, E., Arnold, M., Fairbanks R.G., Hamelin, B., (1993). ^{230}Th - ^{234}U and ^{14}C ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon*, 35(1) p.191-199.
- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., Faure, G., y Rougerie, F. (1996). Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature* 382 p. 241-244.
- Bard, E., Hamelin, B. y Delanghe-Sabatier, D., (2010). Deglacial meltwater pulse 1B and Younger Dryas sea levels revisited with boreholes at Tahiti. *Science*, 327(5970) p.1235-1237.
- Blanchon, P., y Shaw J., (1995). Reef drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse. *Geology* 23 p. 4-8.
- Blanchon, P., (1998). Comment and reply: Continuous record of reef growth over the past 14 ka on the mid-Pacific island of Tahiti. *Geology* 26 p. 479-479.

Blanchon, P., (2004). Taphonomic differentiation of *Acropora palmata* facies in cores from Campeche Bank Reefs, Gulf of Mexico. *Sedimentology*, 51(1) p.53-76.

Blanchon, P., (2011). Geomorphic Zonation of Modern Reefs. *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*. Ed. David Hopley. *Encyclopedia of Earth Science Series*, Springer.

Bouchon, C., (1985). Quantitative study of Scleractinian Coral communities of Tiahura Reef, Moorea Island, French Polynesia. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, p.279-284.

Cabioch, G., Montaggioni L.F., Faure, G., (1999). Reef corallgal assemblages as recorders of paleobathymetry and sea level changes in the Indo-Pacific province. *Quaternary Science Reviews*, 18(14) p.1681-1695.

Cabioch, G., Camoin, G.F. y Cale, N., (1999b). Postglacial growth history of a French Polynesian barrier reef tract, Tahiti, central Pacific. *Sedimentology*, 46(6) p. 985-1000.

Cabioch, G., (2003). Continuous reef growth during the last 23calkyr BP in a tectonically active zone (Vanuatu, SouthWest Pacific). *Quaternary Science Reviews* 22 p. 1771-1786.

Camoin, G., Cabioch, G., Eisenhauer A., Braga, J., Hamelin B., Lericolais G., (2006). Environmental significance of microbialites in reef environments during the last deglaciation. *Sedimentary Geology*, 185(3-4) p.277-295.

Camoin, G.F., Iryu, Y., McInroy, D.B., y IODP Expedition 310 Scientists, (2007). IODP Expedition 310 reconstructs sea level, climatic, and environmental changes in the South Pacific during the last deglaciation. *Scientific Drilling* 5 p.4–12.

Camoin F., Sear, C., Deschapms, P., Webster, J., Abbey., Braga, J., Iryu Y., Durand, N., Bard, B., Hamelin, B., Yokoyama, Y., Thomas, A., Henderson, G., Dussouillez, P., (2012). Reef response to sea-level and environmental changes during the last deglaciation: Integrated Ocean Drilling Program Expedition 310, Tahiti sea level. *Geology* 40 p. 643-646

Carlson, A., E., (2011). Ice Sheets and Sea Level in Earth's Past. *Nature Education Knowledge* 3(5):3

Chevalier, J.P. (1973). Geomorphology and geology of coral reefs in French Polynesia. En *Biology and Geology of Coral Reefs*, O. A. Jones and R. Endean, eds. (Academic Press), p. 113-141.

Davies, P.J. y Montaggioni, L., (1985). Reef growth and sea-level change: the environmental signature. En *Int Coral Reef Sym. Antenne Museum EPHE*, p. 477-515.

Deschamps, P., Durand, N., Bard, E., Hamelin, B., Camoin, G., Thomas, A.L., Henderson, G.M., Okuno, J., and Yokoyama, Y. (2012). Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 years ago. *Nature* 483 p., 559-564.

Done, T.J. (1983). Coral zonation: its nature and significance. *Perspectives on Coral Reefs*, D.J. Barnes, ed. (Australian Institute of Marine Science), p. 107-149.

Dunham, R.J., (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In *Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir* 1, p. 108-121.

Edwards, R.L., Beck, J.W., Burr, G.S., Donahue, D.J., Chappell, J.M., Bloom, A.L., Druffel, E.R., y Taylor, F.W. (1993). A Large Drop in Atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and Reduced Melting in the Younger Dryas, Documented with ^{230}Th Ages of Corals. *Science* 260 p. 962-968.

Fairbanks, R.G. (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342 p. 637-642.

Fairbanks, R.G., Mortlock, R. A., Chiu, T.C., Cao, L., Kaplan, A., Guilderson, T.P., Fairbanks, T.W., Bloom, A. L., Grootes, P.M., y Nadeau, M.J. (2005). Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews* 24 p. 1781-1796.

Flügel, E., (1982). Evolution of Triassic reefs: current concepts and problems. *Fades* 6 p. 297-398

Hanebuth, T., Stattegger, K., y Grootes, P. (2000). Rapid Flooding of the Sunda Shelf: A Late-Glacial Sea-Level Record. *Science* 288 p. 1033-1035.

Harmelin-Vivien, M., (1985). Tikehau atoll, Tuamotu archipelago. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, p.211-268.

Harmelin-Vivien, M.L., y Laboute, P., (1986). Catastrophic impact of hurricanes on atoll outer reef slopes in the Tuamotu (French Polynesia). *Coral Reefs* 5 p. 55-62.

Heindel, K., Wisshak, M. y Westphal, H., (2009). Microbioerosion in Tahitian reefs: a record of environmental change during the last deglacial sea-level rise (IODP 310). *Lethaia*, 42(3) p.322-340.

Hongo, C., y Kayanne, H. (2010). Relationship between species diversity and reef growth in the Holocene at Ishigaki Island, Pacific Ocean. *Sedimentary Geology* 223 p. 86-99.

Hughes, T., Szmant, A., Steneck, R., Carpenter, R., y Miller, S., (1999). Algal Blooms on corals reefs: What are the causes. *Limnology and Oceanography*. 44(6) p. 1583-1586

Humblet, M., Iryu, Y., y Nakamori, T. (2009). Variations in Pleistocene coral assemblages in space and time in southern and northern Central Ryukyu Islands, Japan. *Marine Geology* 259 p. 1-20.

Inoue, M., Yokoyama, Y., Harada, M., Suzuki, A., Kawahata, H., Matsuzaki, H., and Iryu, Y. (2010). Trace element variations in fossil corals from Tahiti collected by IODP Expedition 310: Reconstruction of marine environments during the last deglaciation (15 to 9ka). *Marine Geology* 271 p. 303-306.

Insalaco, E., (1998). The descriptive nomenclature and classification of growth fabrics in fossil scleractinian reefs. *Sedimentary Geology*, 118(1-4) p.159-186.

Inwood, J., Brewer, T., Braaksma, H., y Pezard, P. (2008). Integration of core, logging and drilling data in modern reefal carbonates to improve core location and recovery estimates (IODP Expedition 310). *Journal of the Geological Society* 165 p. 585-596.

Kühlmann, D.H.H. (1983). Composition and ecology of deep-water coral associations. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* 36 p. 183-204.

Liu, J.P., y Milliman, J.D. (2004). Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: Global impacts of rapid sea-level rise. *Journal of Ocean University of China* 3 p. 183-190.

Marshall, P. (1914). *Geology of Tahiti*. Transactions and Proceedings of the Royal Society of New Zealand 1914, Art. XXXIX, Volume 47.

Montaggioni, L.F. (1988). Holocene reef growth history in mid-plate high volcanic islands. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium* 3 p. 455-460.

Montaggioni, L.F., Cabioch, G., Camoin, G.F., Bard, E., Laurenti, A.R., Déjardin, P., Récy, J., Ribaud-laurenti, A., Languedoc, U., y Cedex, M. (1997). Continuous record of reef growth over the past 14 k . y . on the mid-Pacific island of Tahiti. *Geology* 25 p. 555-558.

Montaggioni, L.F. (2005). History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: Development patterns and controlling factors. *Earth-Science Reviews* 71 p. 1-75.

Paterne, M., Ayliffe, L., Arnold, M., Cabioch, G., Tisnerat-Laborde, N., Hatté, C., Douville, E., Bard, E., (2004). Paired ^{14}C and $^{230}\text{Th}/\text{U}$ dating of surface corals from the Marquesas and Vanuatu (sub equatorial pacific) in the 3000 to 15,000 cal yr interval. *Radiocarbon* 46(2) p. 551-566.

Riding, E.R., 2002. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. *Earth-Science Reviews*, 58(1-2), p.163-231.

Rougerie, F., Fichez, R. y Déjardin, P., (1997). Geomorphology and hydrogeology of selected islands of French Polynesia: Tikehau (atoll) and Tahiti (Barrier reef). In H. L. Vacher & M. Q. Terrence, eds. *Developments in Sedimentology Volume 54 Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands*. Elsevier, p. 475-502.

Salvat, B. y Richard, G., (1985). Takapoto atoll, Tuamotu archipelago In B. Delesalle, R. Galzin y B. Salvat (Eds). *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress: French Polynesian coral reefs*. 1. p. 323-378.

Seard, C., Camoin, G., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H., Durand, N., Bard, E., Sepulcre, S., y Deschamps, P. (2011). Microbialite development patterns in the last deglacial reefs from Tahiti

(French Polynesia; IODP Expedition #310): Implications on reef framework architecture. *Marine Geology* 279 p. 63-86.

Stein, M., Torfstein, A., Gavrieli, I., Yechieli, Y., (2010). Abrupt aridities and salt deposition in the post-glacial Dead Sea and their North Atlantic connection. *Quaternary Science Reviews*, 29(3-4), p. 567-575.

Thomas, A.L., Henderson, G.M., Deschamps, P., Yokoyama, Y., Mason, A. J., Bard, E., Hamelin, B., Durand, N., y Camoin, G. (2009). Penultimate deglacial sea-level timing from uranium/thorium dating of Tahitian corals. *Science* 324 p. 1186-1189.

Veron, J.,E.,N., (2000). *Corals of the World*, Vol. 1-3. Australian Institute of Marine Science and CRR Qld Pty Ltd., Australia.

Wentworth, C.K., (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30 p. 377–392.