



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de datos de
elementos de tierras raras
(ETR) de sedimentos de
playa en Yucatán, México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Santoyo Ramos César Augusto

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan José Kasper Zubillaga



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



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.

Para Eustolia y Don Manuel,
por demostrame que la fe mueve montañas.

Nec certam sadem, nec propriam faciem.
nec manus allum peuliare tibi dedimus, o
Adam, ut quam sadem, quam faciem, quae munera
tute optaveris, ea, pro voto, pro tua sententia,
habeas et possideas. Definita ceteris natura intra
praescriptas a nobis leges coercentum. Tu, nullis
angustiis coercitum, pro tuo arbitrio, in cuius
manu te posui, ut circumspiceres inde commodius
quicquid est in mundo. Nec te caelestem neque
terrenum, neque mortalem neque inmortalem
fecimus, ut tui ipsius quasi arbitrarius honorariusque
plastes et fictor, in quam malueris tute
formam effingas...

Pico della Mirandola

Oratio de hominis dignitate

Note he dado ni rostro, ni lugar alguno
que sea propiamente tuyo, ni tampoco ningún
don que te sea particular, ¡oh Adán!, con el fin
de que tu rostro, tu lugar y tus dones seas tú
quien los desee, los conquiste y de ese modo los
poseas por ti mismo. La Naturaleza encierra a
otras especies dentro de unas leyes por establecidas.

Pero tú, a quien nada limita, por tu
propio arbitrio, entre cuyas manos yo te he
entregado, te defines a ti mismo. Te coloqué en
medio del mundo para que pudieras contemplar
mejor lo que el mundo contiene. No te he hecho
ni celeste, ni terrestre, ni mortal, ni inmortal, a
fin de que tú mismo, libremente, a la manera
de un buen pintor o de un hábil escultor,
remates tu propia forma.

Reconocimientos.

El presente trabajo se llevo a cabo bajo la tutoría del Dr. Juan José Kasper Zubillaga en las intalaciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

Al Dr. Juan Jose Kasper Zubillaga por darme la oportunidad de unirme a su grupo de trabajo, por sus aportaciones y recomendaciones para la elaboración de mi tesis, así como por todas esas platicas que fuera de contexto ayudaron de manera indirecta para su elaboración.

A la UNAM, por ser mi hogar y enseñarme que la universalidad del conocimiento nos ayuda a ser mejores seres humanos, Por enseñarme que no importa que tan difícil sea la circunstancia, sino lo importante es no darse por vencido.

A la Facultad de Ingeniería por el honor de ser parte de sus egresados.

A los miembros de jurado de exámen por aceptar y enriquecer el contenido de este trabajo:

M.C. Emiliano Campos Madrigal

Dra. Mayumy Amparo Cabrera Ramírez

M.C. Noe Santillan Piña

M.I. Isabel Domínguez Trejo

A mi familia y amigos por ser fuerza y apoyo, en especial ese viejo roble llamado Rebeca y mostrarme que se tiene que luchar con la razón sin olvidar el corazón. Parte de este trabajo también ha sido mérito suyo.

Finalmente a la ciencia, por ser el medio para disciplinarme frente a la seducción del horizonte enorme de conocimiento.

Resumen.

Los Elementos de Tierras Raras (ETR) sirven como buenos indicadores de procedencia y son esenciales para los estudios ambientales por su baja movilidad. Hasta la fecha, pocos estudios se han llevado a cabo referentes a la relación que puedan existir entre los ETR y los Sedimentos Biógenos Costeros (SBC) localizados en la costa del estado de Yucatán. La porción oriental de la península cuenta con una granulometría más fina a comparación de la región centro y oeste. Uno de los objetivos es cuantificar la posible relación entre los ETR y los SBC, así como aplicar un método estadístico confiable para futuros proyectos de investigación, una interpretación ambiental y depositacional en los SBC.

En este trabajo se analizó la granulometría de las arenas ubicadas en Dzilam de Bravo (Dz), Santa Clara (Scl), Chabihau (Cb), San Crisanto (SCr), Telchac Puerto (Tc), Chicxulum (Cx) y Sisal Puerto (Si) pertenecientes al estado de Yucatán, México. Previamente se llevó a cabo una separación de los SBC para conocer la abundancia del organismo junto con su concentración en ETR por medio de un Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), Modelo iCAP Qc Thermo Scientific, en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Aunque los análisis de correlación son significantes entre algunos ETR y los SBC, esto no nos indica una posible dominancia de algunos ETR sobre los SBC.

Este resultado se respalda con la baja concentración de Eu y Ce en las fracciones carbonatadas tanto de bivalvos como de gasterópodos, lo cual sugiere la poca asimilación de estos elementos y un posible proceso de diagénesis temprana.

Aunque tanto el Eu como el Ce son elementos que están condicionados a tener ciertos comportamientos como anomalías positivas y negativas, dependen en gran medida del patrón de elementos de tierras raras adyacentes a estos, con lo cual, se observó que la posible adherencia es significativamente baja.

Abstract.

Rare Earth Elements (REE) help us as good indicators of origin and are essential for environmental studies because of low mobility. Currently, few studies have been conducted concerning the relationship that may exist between ETR and Biogenic Coastal Sediments (BCS) located on the coast of Yucatan. The eastern portion of the peninsula shows finer sands compared to the western side. One of the objectives of this research is to show the possible relationship between REE and BCS and as well as to compute a reliable statistical method for future research projects, and depositional environmental interpretation of the BCS.

In this paper, a particle size analysis was performed on the sand located in Dzilam Bravo (Dz), Santa Clara (Scl), Chabihau (Cb), San Crisanto (SCr), Telchac Puerto (Tc), Chicxulum (Cx) and Sisal Puerto analyzed (Si) of the the state of Yucatan, Mexico. A separation of BCS has previously been to calculated the abundance of the BCS by means of a Mass Spectrometer with Inductively Coupled Plasma (ICP-MS) Model iCAP Qc Thermo Scientific at the Institute of Geophysics of the UNAM for REE analysis.

Correlation analyzes show that some REE have a significance with BCS which suggests a possible dominance of some REE on the BCS.

This result is supported by the low concentration of Eu and Ce in fractions of both bivalves and gastropods, suggesting little assimilation of this element and a possible early diagenetic process in the BCS.

Although both Eu and Ce are elements that are conditioned to have certain behaviors as positive and negative anomalies depending on the pattern of rare earth elements adjacent to them, it was observed that the possible adhesion to the BCS is significantly low.

Key words: Rare Earth Elements (REE), Biogenic Coastal Sediments (BCS), Pearson correlation, beaches, Yucatan, Mexico.

Índice.

Reconocimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VII
Capítulo 1. Generalidades.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivo general.....	5
1.5 Objetivos particulares.....	5
Capítulo 2. Área de Estudio.....	6
2.1 Generalidades.....	6
2.2 Área de estudio.....	6
2.3 Geología.....	7
2.4 Geomorfología.....	10
2.5 Clima.....	10
2.6 Corrientes Marinas.....	10
2.7 Mareas y Oleaje.....	11
2.8 Vientos.....	13
2.9 Hidrología.....	13
Capítulo 3. Metodología, equipo y software.....	15
3.1 Campo.....	15
3.2 Laboratorio.....	16
3.3 Gabinete y estadística.....	17
Capítulo 4. Análisis Textural.....	18
4.1 Parámetros texturales.....	18
4.2 Análisis de FBC.....	21
4.3 Análisis Granulométrico.....	26
Capítulo 5. Análisis Estadístico.....	34
5.1 Fundamentos numéricos.....	34
5.2 Geoquímica de ETR.....	35
5.3 Restricción de los datos.....	38
5.4 Resultados de la regresión lineal a partir de la correlación Pearson.....	39
5.5. Significancia analítica en los bivalvos.....	43
5.6 Significancia analítica en los gasterópodos.....	45
Capítulo 6. Conclusiones.....	46
6.1 Correlaciones para bivalvos.....	46
6.2 Correlaciones para gasteropodos.....	47

Referencias Bibliográficas e Internet.....	48
Apéndices.....	55
Apéndice 1: Histogramas con sus pruebas K-S, Lilliefors y su expectativa normal para cada una de las variables involucradas.....	55
Apéndice 2: Nivel de significancia (T-student).....	63
Apéndice 3. Gráficos de tendencia de las correlaciones más significativas pertenecientes a los bivalvos y gasteropodos.....	64

Índice de Figuras.

Figura 1. Mapa de localización y ubicación del área de muestreo en la costa norte de Yucatán.....	7
Figura 2. Geología y Provincias Geológicas del Sureste Mexicano.	9
Figura 3. Mapa de localidades de estudio, geología regional, corrientes marinas,	12
Figura 4. Playa de Telchac Puerto. Vista hacia el SEE.	15
Figura 5. Playa de Telchac Puerto	22
Figura 6. Acumulación de conchas en la playa de Telchac Puerto.	26
Figura 7. Histograma para el tamaño gráfico promedio	27
Figura 8. Histograma para el grado de clasificación	31
Figura 9. Histograma para la asimetría.....	32
Figura 10. Histograma para la curtosis.....	33

Índice de Tablas.

Tabla 1. Dominancia de sedimentos biógenos carbonatados (SBC) en las playas de Yucatán (n=28).....	23
Tabla 2. Principales parámetros del tamaño de grano y abundancia relativa de las arenas de Yucatán (n=28).....	28
Tabla 3. Concentraciones de elementos de tierras raras (ETR) en ppm de las playas de Yucatán (n=14).....	37
Tabla 4. Resultados de la correlación pearson pertenecientes a los bivalvos.....	41
Tabla 5. Resultados de la correlación pearson pertenecientes a los gasterópodos.	42

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción.

Varias publicaciones que se ocupan de la distribución, acumulación y transporte en los sedimentos de playa, así como de sus efectos ambientales, se han servido de la geoquímica y mineralogía (Murray et al., 1991). Es por ello, que en los últimos años se ha prestado mucho más atención al comportamiento de los Elementos de Tierras Raras (ETR) en sedimento con relación a su origen, así como en aspectos ambientales por ser elementos inmóviles. Esto es importante porque bajo diferentes condiciones ambientales, los sedimentos pueden actuar como transportadores potenciales para conocer la dinámica y asentamiento de los minerales liberados, así como su ambiente de depósito y los ecosistemas involucrados; tales como dunas, ríos, playas, sedimentos carbonatados y arrecifes de coral (Inman et al, 1966;. Komar y Wang 1984; Mange y Otvos, 2005; Kasper-Zubillaga et al, 2008; 2014).

El análisis de ETR se utiliza en estudios de procedencia y como indicadores de condiciones paleoambientales en ambientes de sedimentos siliciclásticos, carbonatados biógenos y arrecifales (Webb y Kamber, 2000; Olivier y Boyet, 2006; Kasper-Zubillaga et al, 2008a, 2008b, 2010, 2013, 2014). En sedimentos biógenos no se ha determinado la significancia que hay entre la acumulación de los ETR en los sedimentos biógenos costeros (SBC) a partir de cada elemento de los ETR y los organismos más abundantes concentrados en la playa.

Uno de los ambientes sedimentarios de mayor importancia son las playas y dunas, ya que son lugares donde se encuentra una mayor acumulación de sedimento que ha sido transportado por corrientes marinas y viento. Las playas varían con respecto a su geomorfología, pero en su mayoría se pueden catalogar conforme a la existencia de un perfil (Carranza y Caso, 1994).

Dicho perfil representa el equilibrio dinámico entre la transportación del sedimento ya sea por mar (corrientes marinas y oleaje), tierra (sedimentación) y aire (dunas). Carranza y Caso, op. cit, 1994, propone una clasificación para diferenciar las zonas, las cuales se pueden delimitar de la siguiente manera:

- Infraplaya: pertenece a la zona donde siempre está cubierta por agua en condiciones normales. En su mayoría se presentan estructuras de rizadura generadas por el oleaje simétrico, el cual comienza a rozar con el fondo y por lo mismo comienza un movimiento vertical de fondo; sin embargo, por las características del oleaje, no se presenta una transportación hacia la costa.
- Mesoplaya: es la parte de la playa que se encuentra alternadamente cubierta por agua y aire a un ritmo constante. En ocasiones, el límite superior se le conoce como Cresta de Berma o en su ausencia por el límite máximo de la marea, su límite inferior corresponde con el relavado de sedimento en marea baja.

- Supraplaya: es la zona de la playa donde se encuentra seca en condiciones normales; predominan los agentes eólicos sobre los acuosos, puede o no presentar Cresta de Berma y su límite puede estar constituido por dunas estabilizadas, que son apilamiento de arena localizadas por encima del nivel del mar y expuestas a la actividad del viento.

El área de estudio que abarca la costa en la Península de Yucatán se compone de carbonatos, tanto en tierras sumergidas como en superficie. Las arenas carbonatadas en la porción este de la península cuenta con una granulometría más fina en comparación de la región centro y oeste. Las corrientes de alta energía en la región este son las responsables de la acumulación de bivalvos, gasterópodos y algas calcáreas, así como foraminíferos, oolitas y restos de coral (Nolasco -Montero y Carranza-Edwards, 1988; Kasper-Zubillaga et al., 2015).

Webb y Kamber (2000) han demostrado que los sedimentos carbonatados recientes son de origen microbial. Las microbialitas producen sustancias especiales que permiten que pequeñas partículas contenidas en el agua de mar se adhieran, esto permite la formación de capas de roca o bien consumen minerales disueltos para posteriormente excretarlos y formar sedimento como producto de su metabolismo. Dichas sustancias se incorporan con un contenido en ETR a un ritmo constante. Estos ETR en las microbialitas son un proxy confiable para conocer la procedencia en los SBC.

Sin embargo los ETR en carbonatos muestran un decremento en la concentración de ETR ligeras del lantano al europio con patrones normalizados por debajo de las señales del agua de mar (Johannesson et al., 2007; Kasper-Zubillaga et al., 2015) y con diferentes anomalías especialmente centradas en el cerio y europio (Lavoie and Bergeron 1993; Sholkovitz 1995; Byrne and Sholkovitz 1996; Lawrence et al. 2006; Horta-Puga and Carriquiry 2012; Kasper-Zubillaga et al, 2014; Kasper-Zubillaga et al., 2015).

1.2 Hipótesis.

Por medio de un análisis paramétrico Pearson se comprobará que los ETR y los SBC tienen una correlación para cada elemento de los ETR en fracciones biógenas y se asume que ésta tiene relación con las fracciones más gruesas de los SBC por ser posiblemente más abundantes y de mayor tamaño durante la observación y separación hechas en el campo y laboratorio, respectivamente.

1.3 Justificación

Para definir con mayor confiabilidad el contenido de ETR en los SBC se utiliza un método estadístico que involucre los ETR con los SBC en una zona influida exclusivamente por restos de organismos carbonatados y sin influencia de terrígenos procedentes de la Península (Webb and Kamber, 2000; Jupiter, 2008; Kasper-Zubillaga et al, 2014).

Esto nos permitirá entender como funcionan los ETR como trazadores en los SBC durante los procesos de meteorización continental; ej. lluvia, el suministro de ETR y su grado de acumulación en fracciones biógenas carbonatadas.

1.4 Objetivo general

- Hacer un análisis cuantitativo de los SBC con los ETR en la costa de Yucatán para establecer la correlación que existe en una región ausente de influencia terrígena y dominada exclusivamente por detritus de origen biógeno mediante un análisis paramétrico tipo Pearson y observar posible dominancia de ciertos ETR en las fracciones biógenas.

1.5 Objetivos particulares

- Cuantificar la influencia de los ETR sobre los SBC cuya aparente relación es insignificante en sedimentos carbonatados recientes.
- Aplicar un método estadístico al estudio comparativo entre la granulometría en SBC y los ETR para respaldar la interpretación ambiental y depositacional de los SBC.

Capítulo 2. Área de Estudio

2.1 Generalidades

En el estudio de sedimentos hay varios factores que son los responsables de las características propias de su composición; tales como clima, relieve, tipo de roca, etc (Pettijohn, 1975; Potter, 1994). La arena de playa nos muestra las fuentes de procedencia, así como el sistema fluvial mediante el cual se trasportó dicho sedimento (Komar y Inman, 1970; Komar, 1976). En el caso de la Península de Yucatán donde se presenta la ausencia de sistemas de aguas superficiales, se tiene en las playas, sedimentos de tipo biógeno. La costa de Yucatán cuenta con una planicie baja, ausente de sistemas montañosos a excepción de la Sierrita de Ticul, donde el 57% consta de ambientes tipo lagunar de islas de barrera y el 43% están frente al mar (CINVESTAV, 2007).

2.2 Área de estudio.

La Península de Yucatán (19°22' N, 89°12' W) es una plataforma calcárea de 197.600 km², situada en el sureste de México, entre el Golfo de México al oeste y al norte y al este con el Mar Caribe. El límite sur de la Península bordea a Guatemala y Belice. Finalmente, en el suroeste limita con los estados mexicanos de Chiapas y Tabasco. El estado de Yucatán que se localiza en la península, cuenta con una superficie de 38.402 km² (Figura 1). La península tiene una anchura media de unos 320 km y una línea de costa de unos 1.100 km (CINVESTAV, 2007).



Figura 1. Mapa de localización y ubicación del área de muestreo en la costa norte de Yucatán. Fuente: INEGI. Marco Geostatístico Municipal 2010, versión 5.0.

2.3 Geología.

Las rocas más antiguas son metamórficas y pertenecen al Paleozoico en la zona nor-oriental, donde forma un alto estructural, el cual aportó sedimentos a lo largo del Jurásico Inferior, existiendo evaporitas y lutitas carbonatadas, así como evaporitas y dolomías asociadas con areniscas submaduras oxidadas (López-Ramos, 1983).

Durante el Cretácico Inferior hasta el Oligoceno se reportan varias facies transgresivas pertenecientes a rocas carbonatadas de plataforma y evaporíticas. Se presentan de forma horizontal y localmente existen cambios de espesor debido a fallas profundas que delimitan fosas tipo “rift”. En el norte de la península los espesores pertenecientes a la columna paleógena y la del Cretácico Medio e Inferior conservan su espesor, pero la columna del Cretácico Superior se engrosa. Los depósitos de rocas carbonatadas de plataforma de la Península se extienden a la costa (Ward y Weidie, 1978).

El Cretácico Medio consiste de calizas, dolomías y anhidritas desarrolladas en un ambiente somero (Formación Cobán). Durante este tiempo se crea el límite de la provincia geológica conocida como “El Escarpe de Campeche” en el actual margen norte. Para el Cretácico Superior se presenta calizas, dolomías y anhidritas que van cambiando hacia la parte oeste por conglomerados marinos (grainstone) y hacia el este por rocas carbonatadas pelágicas profundas (mudstone). Dichos cambios se atribuyen al inicio del fallamiento en bloques a lo largo del Río Hondo, el cual es provocado por el desplazamiento de la Placa del Caribe (Meneses, 1980) (Figura 2). Durante el Paleoceno - Eoceno el nivel del mar osciló en varias ocasiones teniendo como resultado la Formación Icaiche y Formación Chichen-Itzá, las cuales están constituidas por calizas, dolomías y margas que cuentan con microfósiles pertenecientes a ambientes de supramarea (Aguayo-Camargo, 1978). Estas unidades afloran en la Península de Yucatan.

Los depósitos pertenecientes al Eoceno son calizas arcillosas con nódulos de pedernal negro intercaladas con margas. Para el Mioceno-Plioceno se presentan carbonatos con calizas de plataforma (Formación Carrillo Puerto). Se tienen también calizas arcillosas y coquinas que afloran predominantemente en la porción norte y este de la Península (Ward y Wilson, 1974).

El Cuaternario aflora en la zona costera y consta de depósitos calcáreos expuestos después de una ligera emersión de la Plataforma Yucateca (Figura 2).

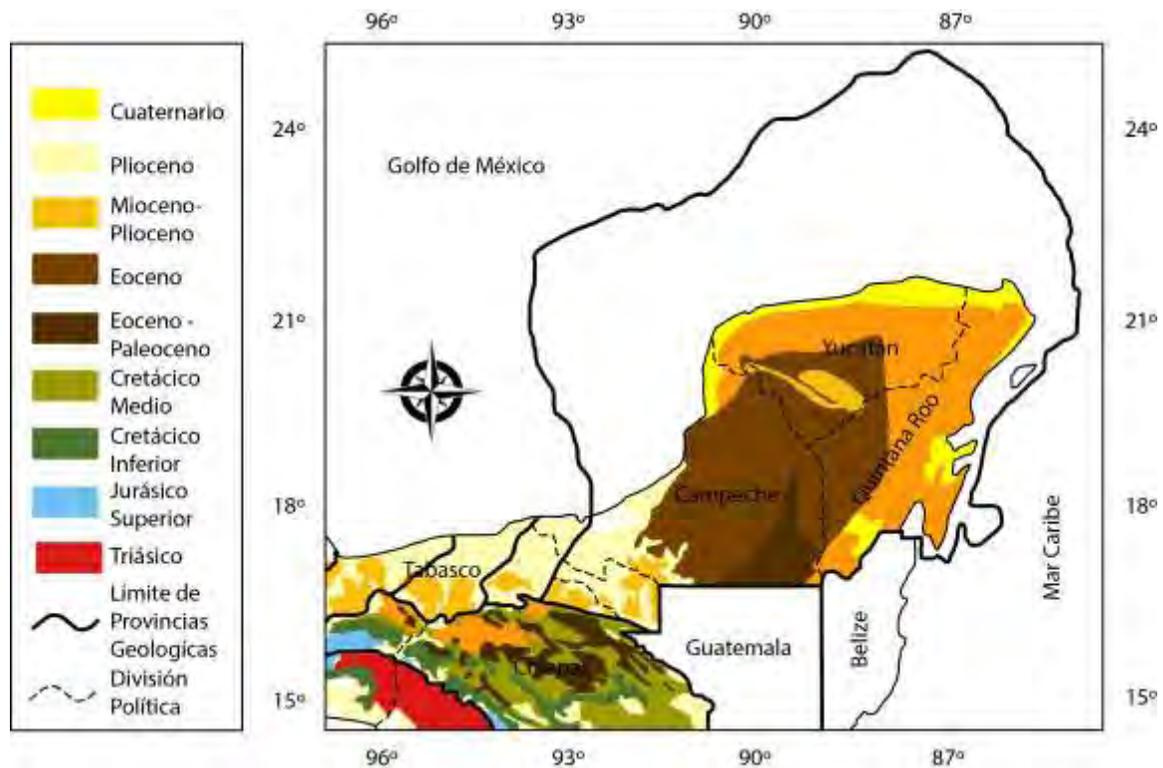


Figura 2. Geología y Provincias Geológicas del Sureste Mexicano. Fuente: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 1980.

2.4 Geomorfología.

Shepard (1973) reporta que el área estudiada corresponde a la clasificación de costas primarias, por erosión terrestre, con topografía kárstica sumergida y costas secundarias, formadas por depósitos marinos de tipo barrera, islas de barrera y ganchos de barrera constituida por sedimentos biógenos y arrecifes coralinos. La ausencia de ríos superficiales no contribuyen a suministrar agua dulce hacia el mar.

2.5 Clima.

El clima es de tipo calido sub-húmedo con temperaturas que oscilan entre 22° y 26° C con una precipitación anual promedio de 1000 a 2000 mm. La costa norte tiene un clima seco con temperaturas similares a lo largo de la costa pero con una precipitación que va de los 300 a los 600 mm anuales (INEGI, 2010).

2.6 Corrientes Marinas.

La costa de la Península de Yucatán se ve afectada por la Corriente del Golfo. En dicha corriente existen otras más pequeñas y remolinos que llegan al norte de Yucatán. La corriente marina superficial pasa por el Canal de Yucatán y sale por el Estrecho de la Florida; en este tramo se encuentra la llamada Corriente de Lazo, que recibe su nombre porque es una curva muy pronunciada.

Las corrientes marinas predominantes en la costa norte, llevan una dirección hacia el Oeste, paralelas a la costa, con velocidad promedio de 25.72 cm / s y máximas de más de 102 cm / s (Figura 3) (Férrandez-Eguiarte et al, 1992).

A partir del Canal de Yucatán sube por el lado este del Golfo, da una curva pronunciada y sale por el Estrecho de La Florida, sin regresar a la Península. Se trata de corrientes cálidas con velocidades medias de 20 a 90 cm / s en el verano e invierno respectivamente (Fernandez-Eguiarte et al., 1992).

2.7 Mareas y Oleaje.

El tipo de marea es diurna con una máxima amplitud de 1.2 m, de acuerdo a mediciones del mareógrafo de Puerto Progreso. Por otro lado, el área de estudio se ve afectado por un oleaje intenso durante todo el año. La dirección predominante es de Este a Noreste generado por los vientos predominantes de la región (E, NE, SE). Al acercarse a la costa se refracta por las bajas profundidades, por lo que al llegar a la playa se presenta con una dirección NE con altura de 1 a 2 m bajo los efectos de “nortes” intensos (Enriquez, 2010).



Figura 3. Mapa de localidades de estudio, geología regional, corrientes marinas, dirección e intensidad del viento. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2005.

2.8 Vientos.

La península de Yucatán se encuentra bajo la influencia de los vientos alisios. Durante el verano, estos vientos proceden de la Celda Bermuda Azores y están cargados de humedad, por lo que depositan cada vez más precipitación conforme se adentran al continente. Es por ello que se presentan distintos regímenes de lluvia tanto en la costa como al interior. Durante el invierno, se llegan a registrar vientos provenientes del N y NNW con bajas temperaturas y algunas lluvias (mejor conocidos como “nortes”), a estos vientos se les conoce con el nombre de “Chikin’ik”. Las velocidades medias son de 5 a 7 m/s en el verano e invierno respectivamente (Pérez-Villegas, 1990).

2.9 Hidrología.

Una característica de la Península de Yucatán es la ausencia de corrientes superficiales, salvo cuerpos de agua temporales y una gran cantidad de agua subterránea. Es uno de los pocos estados en la República Mexicana donde no hay ausencia de agua potable, dada la composición de su subsuelo, geomorfología y sus condiciones climáticas. El subsuelo se encuentra formado por calizas de diferentes composiciones, depósitos de litoral con un espesor promedio de 150 m.

En acuíferos cársticos, como el de la Península, la alta conductividad hidráulica se debe a una combinación de la permeabilidad primaria de la roca, el grado de fracturamiento, los conductos de disolución y la alta precipitación pluvial (Back y Lesser, 1981; Reeve y Perry, 1990). Las cuevas, cenotes y canales submarinos en Yucatán provienen de flujos de agua subterránea hacia la costa que influye en la salinidad en el agua marina somera (Perry and Velazquez, 1996).

Capítulo 3. Metodología, equipo y software.

3.1 Campo

Se muestrearon 8 playas de la costa de Yucatán, las cuales abarcan 171 km. Las localidades muestreadas fueron Dzilam de Bravo (Dz), Santa Clara (Scl), Chabihau (Cb), San Crisanto (SCr), Telchac Puerto (Tc), Chicxulum (Cx) y Sisal Puerto (Si) (Figura 3). La muestra superficial de sedimento fue tomada en las zonas de infra, meso y supraplaya definidas como el límite inferior de rompiente, zona de vaivén del oleaje y la zona superior al límite de pleamar.



Figura 4. Playa de Telchac Puerto. Vista hacia el SEE.

3.2 Laboratorio.

Se realizará una separación de los SBC para identificar los componentes carbonatados más abundantes (principalmente bivalvos y gasterópodos) de acuerdo al método propuesto por Kasper-Zubillaga et al. (2015), el cual se basa en el recuento de partículas bajo el microscopio para determinar las Fracciones Biógenas Costeras (FBC) y para calcular sus porcentajes en las muestras que consta de 250 granos en cada una. El análisis granulométrico de los sedimentos de playa se realizó con tamices estandarizados provenientes de EE.UU. (Folk, 1980). Para determinar los parámetros de las partículas se utilizó una Hoja Excel Gradistat V8, basada en Folk y Ward, donde se calcularon el tamaño de grano, desviación estándar, oblicuidad y curtosis utilizando tamices en términos de unidades phi (ϕ) (-0.75 ϕ , -0.5 ϕ , -0.25 ϕ , 0.25 ϕ , 1.0 ϕ , 1.25 ϕ , 2 ϕ , 2.5 ϕ , 2.75 ϕ , 3 ϕ , 3.25 ϕ , 3.5 ϕ , 3.75 ϕ , 4.25 ϕ). La geoquímica de ETR ya realizada por medio de un Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) Modelo iCAP Qc Thermo Scientific en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México utilizará los datos de ETR sin normalizar para su correlación con los SBC. El aparato es calibrado con 162 soluciones de alta certificación con concentraciones de Li, Co, In, Ba, Bi, Ce y U de 1 $\mu\text{g/L}$. La curva de calibración es construida a partir de 12 puntos con concentraciones de 0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 25, 164 y 50 $\mu\text{g/L}$, iniciando con la solución de multi-elementos a 10 $\mu\text{g/ml}$ (ICP-MS-B).

3.3 Gabinete y estadística.

La correlación Pearson se realizará en base al ajuste de normalidad de los datos si estos no siguen una distribución Gauss mediante la transformación de los datos a índices Log_{10} ó Ln (Aitchinson, 1986; Kasper-Zubillaga et al, 2007). Es importante recalcar que la distribución normal o gaussiana es una de las distribuciones de probabilidad que más se asemejan a fenómenos naturales, y por eso es necesaria la transformación en caso necesario. El paquete a utilizar es STATISTICA (Software, V. 10) para las correlaciones entre los parámetros granulométricos, cada ETR, y cada conteo realizado de bivalvos y gasterópodos separados de los SBC.

Capítulo 4. Análisis Textural.

El análisis granulométrico tiene por objetivo determinar el tamaño de las partículas y su distribución en una muestra recolectada tal y como se depositó. Esto nos ayuda a determinar el tipo de ambiente y sus particularidades.

En este estudio se cuartearon las muestras para después ser colocadas en tamices. Los tamices seleccionados van desde $-0.75 (\phi)$ a $4.25 (\phi)$ según el método de Folk (1980), los cuales fueron colocados en un Tamizador RO-TAP Modelo RX-29. Cada una de las fracciones obtenidas fue pesada para obtener un porcentaje acumulativo. Los parámetros texturales fueron calculados utilizando el programa Gradistat V8. el cual nos proporcionó datos referentes al tamaño de grano, desviación estándar, oblicuidad y curtosis.

4.1 Parámetros texturales.

El tamaño de grano (Mz) esta representado por la media en una distribución total de sedimento. Este parámetro nos ayuda a determinar si el sedimento esta influenciado por diferentes condiciones deposicionales como son: la velocidad del agente de transporte; ya sea por medio de agua o aire, la forma, la gravedad específica, la composición, la durabilidad y la resistencia del mismo.

Para su cálculo se utiliza la siguiente relación:

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

cuyos parametros de acuerdo con Folk y Ward (1957) corresponden a:

Mz (ϕ)	Clase de Tamaño
-1.01 - 0.0	Arena muy gruesa
0.01 - 1.0	Arena gruesa
1.01 - 2.0	Arena media
2.01 - 3.0	Arena fina
3.01 - 4.0	Arena muy fina.

El grado de clasificación (σ) depende del tamaño de grano y sirve como referencia de la energía o el ambiente de depósito, así como saber si existen fracciones más gruesas o finas en la muestra. Esta influenciada por: el grado de turbulencia, la velocidad de transporte, características hidrodinámicas y el tiempo que permanecen en el ambiente deposicional (Micknney y Friedman, 1967).

Su relación es la siguiente:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} + \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} + \phi_{50}}{6.6}$$

Sus resultados corresponden a :

σ (ϕ)	Índice de Clasificación
< 0.35	Muy bien clasificado
0.35 - 0.50	Bien clasificado
0.50 - 0.71	Moderadamente bien clasificado
0.71 - 1.00	Moderadamente clasificado
1.00 - 2.00	Mal clasificado
2.00 - 4.0	Muy mal clasificado
> 4.0	Extremadamente mal clasificado

La oblicuidad se refiere específicamente a la Asimetría (Ski), con la cual observamos el comportamiento gráfico de la muestra dependiendo del tamaño de grano predominante y se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$Ski = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2(\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2(\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Los resultados corresponden a la siguiente relación:

Ski (ϕ)	Índice de Asimetría
1.0 – 0.3	Muy asimétrico a los tamaños finos.
0.3 – 0.1	Asimétrico a los tamaños finos.
0.1 – (- 0.1)	Casi simétrico
-0.1 – (- 0.3)	Asimétrico a los tamaños gruesos.
-0.3 – (- 1.0)	Muy asimétrico a los tamaños gruesos.

La curtosis (KG) es la comparación entre la dispersión de la parte central y los extremos de la curva. Se calcula mediante la fórmula:

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})}$$

El resultado según Folk (1980), nos indica como se distribuye la muestra:

K_G (ϕ)	Curtosis
< 0.67	Muy platicúrtica
0.67 - 0.90	Platicúrtica
0.90 - 1.11	Mesocúrtica
0.11 - 1.50	Leptocúrtica
1.50 - 3.00	Muy Leptocúrtica
> 3.0	Extremadamente leptocúrtica

4.2 Análisis de FBC.

El análisis de las FBC se llevó a cabo en secciones finas de todo el sedimento en conjunto. Se contabilizaron 250 granos en cada sección para posteriormente hacer un recuento de partículas bajo microscopio y determinar las fracciones junto con su respectivo porcentaje (Kasper-Zubillaga et al., 2015).

El conteo se basa en la determinación de microorganismo de las muestras previamente cuarteadas y formadas por: detritus de moluscos, fragmentos de coral, algas, oolitas, foraminíferos, briozoos y ostrácodos, los cuales se presentan en cada muestra (Nolasco-Montero and Carranza-Edwards, 1987).

En este estudio, se obtuvo un 97% de FBC en el recuento de partículas (n = 7000 granos) para 28 láminas delgadas, teniendo niveles de confianza del 95%. Los puntos tomados en cada conteo de partícula se realizaron utilizando la intersección en forma de cruz de cada grano observado. Este método se aplicó en cada lámina delgada de toda la composición a granel previamente homogeneizada para evitar sesgo (Swan and Sandilands, 1995). Además, se realizaron identificaciones taxonómicas generales con los mejor conservados ej. bivalvos vs. gasterópodos, para investigar sus condiciones de forma de vida y/o aloctonía, es decir, si los organismos estudiados fueron transportados por la dinámica costera o se encontraron *in situ* (Callender et al. 1992; Kasper-Zubillaga et al., 2015 Reguero-Reza, comm. personal).

Se encontró que los organismos más abundantes son los bivalvos, con valores del 88.1% al 99.2% en las playas que van de Dzilam (Dz) a Chicxulum (Cx), respectivamente. El segundo más abundante corresponde a los gasterópodos, que van desde el 0.1% al 6.0%, de Progreso a Dzilam (Dz), respectivamente. El resto de las FBC incluyen cantidades menores. Dichas abundancias siguen el patrón: foraminíferos > briozoos > ostrácodos, corales y espículas. (Figura 5 y Tabla 1).



Figura 5. Playa de Telchac Puerto (nótese la abundancia de conchas)

Tabla 1. Dominancia de sedimentos biógenos carbonatados (SBC) en las playas de Yucatán (n=28); i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad.

Playa	Muestra	Bivalvos	Gasterópodos	Fragmentos de coral	Algas	Oolitas	Foraminífera	Espículas	Briozoarios	Ostrácodos	Total
Dzilam	Di2	159.0	63.0	1.0	1.0	5.0	19.0	0.0	1.0	1.0	250.0
	Dm2	221.0	6.0	8.0	0.0	1.0	14.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	Ds2	237.0	4.0	1.0	0.0	0.0	6.0	1.0	1.0	0.0	250.0
	D2	246.0	1.0	1.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	D3	238.0	1.0	4.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	Promedio	220.2	15.0	3.0	0.2	1.2	9.6	0.2	0.4	0.2	0.0
	Límites de confianza	31.0	23.6	2.7	0.4	1.9	6.0	0.4	0.5	0.3	0.0
Santa Clara	Sci1	238.0	4.0	1.0	0.0	1.0	2.0	0.0	4.0	0.0	250.0
	Scm2	241.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	1.0	250.0
	Scs1	246.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	250.0
	Sc1	242.0	0.0	2.0	0.0	0.0	3.0	1.0	1.0	1.0	250.0
	Sc3	177.0	61.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	2.0	0.0	250.0
	Promedio	228.8	13.0	1.0	0.0	0.2	4.0	0.8	1.8	0.4	0.0
	Límites de confianza	25.5	23.6	0.9	0.0	0.4	3.0	0.7	1.3	0.0	0.0

Tabla 1. Dominancia de sedimentos biógenos carbonatados (SBC) en las playas de Yucatán (n=28); i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad (Continuación).

Playa	Muestra	Bivalvos	Gasterópodos	Fragmentos de coral	Algas	Oolitas	Foraminífera	Espículas	Briozoarios	Ostrácodos	Total
Chabihau	Cbi1	240.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	2.0	250.0
	Cbm2	239.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	2.0	250.0
	Cbs	244.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	250.0
	Promedio	241.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	1.3	0.0
	Límites de confianza	3.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0
San Crisanto	Cri1	247.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	250.0
	Crm2	247.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	Crs2	249.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	Promedio	247.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.3	0.0
	Límites de confianza	1.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.7	0.0	0.0
Telchac	Ti2	245.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.0	2.0	0.0	250.0
	Tm2	239.0	7.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0	0.0	250.0
	Ts2	244.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	250.0
	Promedio	242.7	3.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.3	0.0	250.0
	Límites de confianza	3.6	3.6	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.7	0.0	0.0

Tabla 1. Dominancia de sedimentos biógenos carbonatados (SBC) en las playas de Yucatán (n=28); i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad (Continuación).

Playa	Muestra	Bivalvos	Gasterópodos	Fragmentos de coral	Algas	Oolitas	Foraminífera	Espículas	Briozoarios	Ostrácodos	Total
Chicxulub	Cxi2	247.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	250.0
	Cxm2	248.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	250.0
	Cxs2	249.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	250.0
	Promedio	248.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.7	0.0
	Límites de confianza	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0
Progreso	Pi1	247.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	250.0
	Pm2	246.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	250.0
	Ps1	249.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	250.0
	Promedio	198.2	0.8	0.0	0.0	0.0	1.0	0.2	0.2	0.5	0.0
	Límites de confianza	139.3	0.9	0.0	0.0	0.0	1.5	0.6	0.3	1.1	0.0
Sisal	Si1	215.0	32.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	250.0
	Sm2	247.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	250.0
	Ss3	240.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	1.0	250.0
	Promedio	234.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.7	3.7	0.0	0.7	0.0
	Límites de confianza	19.0	1.1	0.0	0.0	0.0	1.3	5.3	0.0	0.7	0.0

4.3 Análisis Granulométrico.

A lo largo de la costa de Yucatán se encontraron arenas de tamaño medio a fino, moderadamente clasificada, asimétricas a los tamaños gruesos y con una curtosis leptocúrtica. Las arenas son una mezcla de finos (41%), medios (37%), gruesos (18%) y de fracciones muy finas (47%).

El hecho de que la mayoría de las muestras se ubiquen en tamaño de grano medio a fino, se debe a que las arenas de playa están estrechamente relacionadas con el aporte de conchas, en este caso; la amplia presencia de bivalvos y gasterópodos, la ausencia de terrígenos la cual está controlada por la geología característica de la Península de Yucatán, la ausencia de ríos superficiales y la composición geoquímica de las rocas ej. calizas. (Watson, 1971; Weidie, 1985) (Figura 6).



Figura 6. Acumulación de conchas en la playa de Telchac Puerto.

La presencia de corrientes litorales a lo largo de la costa junto con la erosión eólica son mecanismos importantes para concentrar las fracciones biogénicas durante su transporte y depositación (Watson, 1971). En cuanto a su preservación, las muestras presentan señales de abrasión extrema, fragmentación y evidencia de transporte físico, lo cual nos proporciona el tamaño fino restante.

Se obtuvieron valores de $Mz (\phi)$ de 0.00 a 1.00 (arenas gruesas) y $\sigma (\phi)$ de entre 0.50 a 1.80 (arenas que van de bien clasificada a pobremente clasificadas), pertenecientes a Dzilam (Dz), seguido de Santa Clara (Scl), Telchac (Tc), Progreso (P), Chicxulub (Cx) y Sisal (Si) (Ver Tabla 2). Para el siguiente grupo de muestras: Ds2, Dm2, D2 y Di2; Cb1; Ti2; Pi1; Cxi2 y Sm2, y sobre todo las arenas de la playa Dzilam sugieren claramente el efecto de la depositación de la fracción gruesa (%) en playas con costas estables y deposicionales (Appendini et al. 2012). En promedio, se tienen valores de 1.62 con $n=28$, lo que nos indica que en su mayoría corresponde a una arena de grano medio (Figura 7).

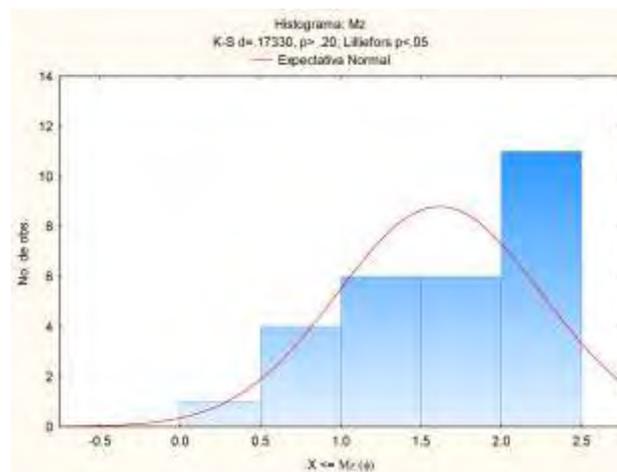


Figura 7. Histograma para el tamaño gráfico promedio, junto con su ajuste de normalidad ($Mz (\phi)$)

Tabla 2. Principales parámetros del tamaño de grano y abundancia relativa de las arenas de Yucatán (n=28). Mz (ϕ) = Tamaño de grano; σ (ϕ) = grado de clasificación; Ski = asimetría; K_G = curtosis; CS = arena gruesa; MS = arena media; FS = arena fina; VFS = arena muy fina; i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad.

Playa	Muestra	Mz (ϕ)	σ (ϕ)	Ski	K_G	CS	MS	FS	VFS	Total
Dzilam	Di2	1.14	1.75	0.15	0.52	14.6	8.4	17.4	23	63.4
	Dm2	0.66	1.58	0.54	0.56	18.8	5	14	12.6	50.4
	Ds2	1.25	0.62	0.42	0.92	47.4	42.6	8.2	0.4	98.6
	D2	1.1	1.34	-0.55	0.55	18.2	28.8	25	0.6	72.6
	D3	2.25	0.52	-0.36	1.31	6.2	29.2	62.2	1	98.6
	Promedio	1.28	1.16	0.04	0.77	21.04	22.80	25.36	7.52	76.72
	Límites de confianza	0.51	0.49	0.42	0.30	13.65	13.81	18.82	8.84	18.82
Santa Clara	Sci1	1.29	1.45	-0.54	0.91	11.6	20	44.6	3.4	79.6
	Scm2	2.42	0.43	-0.09	1.15	1.2	19.2	72.8	6.8	100
	Scs1	2.2	0.41	-0.42	1.2	3.2	37.4	58.2	0.8	99.6
	Sc1	2	0.85	-0.43	1.45	13	34.4	45	5	97.4
	Sc3	1.5	0.8	-0.61	1.32	21.2	56	11.4	1.6	90.2
	Promedio	1.88	0.79	-0.42	1.21	10.04	33.40	46.40	3.52	93.36
	Límites de confianza	0.42	0.37	0.18	0.18	7.08	13.21	19.92	2.15	7.57

Tabla 2. Principales parámetros del tamaño de grano y abundancia relativa de las arenas de Yucatán (n=28). Mz (ϕ) = Tamaño de grano; σ (ϕ) = grado de clasificación; Ski = asimetría; K_G = curtosis; CS = arena gruesa; MS = arena media; FS = arena fina; VFS = arena muy fina; i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad (Continuación).

Playa	Muestra	Mz (ϕ)	σ (ϕ)	Ski	K_G	CS	MS	FS	VFS	Total
Chabihau	Cbi1	0.55	1.45	0.48	0.5	14	7	26.6	3	50.6
	Cbm2	1.9	0.65	-0.2	1.33	9	39	48	0.8	96.8
	Cbs	2.19	0.47	-0.36	1.31	5.4	39.4	53.4	0.8	99
	Promedio	1.55	0.86	-0.03	1.05	9.47	28.47	42.67	1.53	82.13
	Límites de confianza	0.99	0.59	0.50	0.54	4.89	21.04	16.04	1.44	30.93
San Crisanto	Cri1	1.95	1.08	-0.53	1.16	10.8	26.6	46	6	89.4
	Crm2	2.22	0.44	-0.36	1.24	3.6	35.2	60.4	0.8	100
	Crs2	2.02	0.43	0.11	1.31	8	56.2	36.2	0	100.4
	Promedio	2.06	0.65	-0.26	1.24	7.47	39.33	47.53	2.27	96.60
	Límites de confianza	0.16	0.42	0.38	0.08	4.11	17.23	13.77	3.69	7.06
Telchac	Ti2	0.1	1.25	0.89	0.52	12.4	15.4	15.6	0	43.4
	Tm2	2.04	0.67	-0.48	1.34	9.6	31.2	56.2	0.6	97.6
	Ts2	1.69	0.71	-0.37	0.99	21	52.4	24	0	97.4
	Promedio	1.28	0.88	0.01	0.95	14.33	33.00	31.93	0.20	79.47
	Límites de confianza	1.17	0.37	0.86	0.47	6.72	21.01	24.25	0.39	35.34

Tabla 2. Principales parámetros del tamaño de grano y abundancia relativa de las arenas de Yucatán (n=28). Mz (ϕ) = Tamaño de grano; σ (ϕ) = grado de clasificación; Ski = asimetría; K_G = curtosis; CS = arena gruesa; MS = arena media; FS = arena fina; VFS = arena muy fina; i = infraplaya; m= mesoplaya; s = supraplaya. Los números corresponden a la primera, segunda y tercera muestra recolectada a 1.70 [m] de profundidad (Continuación).

Playa	Muestra	Mz (ϕ)	σ (ϕ)	Ski	K_G	CS	MS	FS	VFS	Total
Chicxulub	Cxi2	0.85	1.34	-0.13	0.57	19	26.4	23.4	0.6	69.4
	Cxm2	2.23	0.45	-0.24	1.26	2.6	39.4	54.6	3.4	100
	Cxs2	1.64	0.69	-0.38	0.94	24.2	55.6	17.8	0	97.6
	Promedio	1.57	0.83	-0.25	0.92	15.27	40.47	31.93	1.33	89.00
	Límites de confianza	0.78	0.52	0.14	0.39	12.76	16.55	22.44	2.05	19.26
Progreso	Pi1	1.13	1.38	-0.53	0.69	14.8	32.4	26.8	1.8	75.8
	Pm2	2.2	0.48	-0.26	1.26	4.2	43.4	50.4	1.6	99.6
	Ps1	1.66	0.9	-0.44	1.38	18.2	50.6	22.4	0.6	91.8
	Promedio	1.66	0.92	-0.41	1.11	12.40	42.13	33.20	1.33	89.07
	Límites de confianza	0.61	0.51	0.16	0.42	8.26	10.37	17.04	0.73	13.73
Sisal	Si1	2.31	0.71	-0.33	1.46	9.6	23.4	57.6	6.4	97
	Sm2	0.71	0.55	-0.29	3.99	75	19	1	0	95
	Ss3	2.02	0.43	0.18	1.32	6.2	60.2	33	0.6	100
	Promedio	1.68	0.56	-0.15	2.26	30.27	34.20	30.53	2.33	97.33
	Límites de confianza	0.96	0.16	0.32	1.70	43.88	25.60	32.11	4.00	2.85

Las muestras Di2, Dm2, y D2; Sc1; Cb1; Cr1; Sci1; Ti2; Pi1 y Cxi2 se ubican dentro de una mala clasificación, ya que se encuentran por encima del 1.0 (ϕ) (tabla 2; figura 8), por lo tanto tendremos una gran variedad de tamaños. Con el resto de muestras, se obtuvieron valores menores, dando como resultado una clasificación moderada. Sin embargo, sí tomamos el promedio $\sigma (\phi) = 0.85$ encontramos una tendencia de grano moderadamente clasificado.

Las arenas mal clasificadas están dentro del rango de arenas gruesas, mientras que las bien clasificadas contienen una abundancia de grano fino, lo que sugiere la presencia de gruesos como de finos dentro de una clasificación moderada con abundancia de granos medios en promedio.

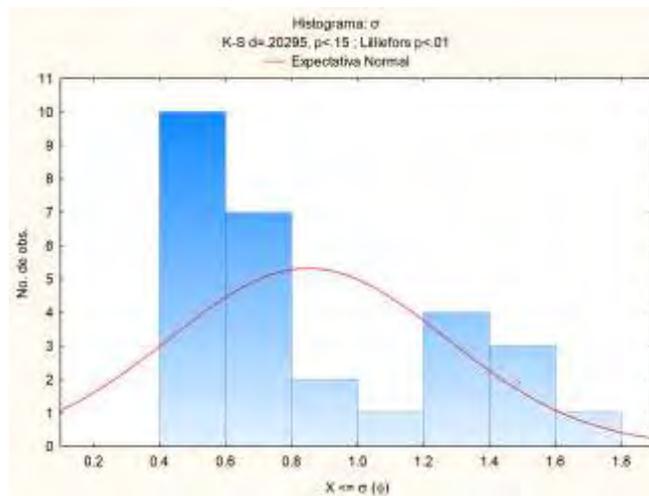


Figura 8. Histograma para el grado de clasificación, junto con su ajuste de normalidad ($\sigma (\phi)$).

Respecto al grado de simetría (Ski), las muestras presentan valores promedio de -0.18, por lo tanto, las arenas son asimétricas hacia los gruesos (Figura 9). Desde Sisal (Si) hasta Santa Clara (Sc), se puede apreciar la tendencia hacia los gruesos. Dzilam (Dz) nos muestra valores de simetría positivos, lo que nos indica la tendencia de tamaño fino, tal vez debido al aumento de foraminíferos en comparación con el resto de las playas, así como el oleaje, las corrientes marinas y la erosión eólica (ver Tabla 2).

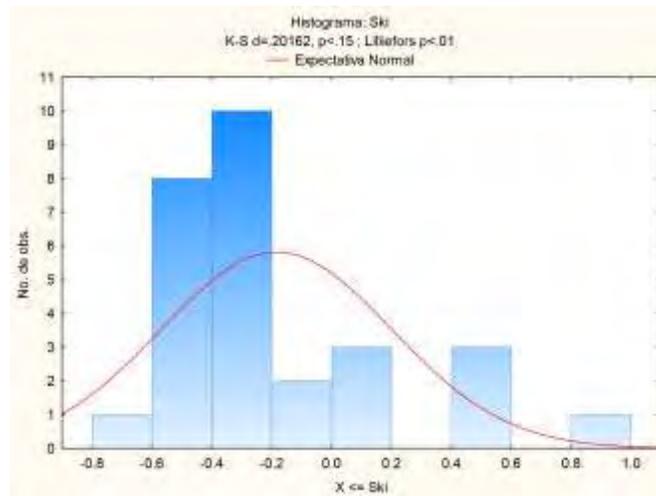


Figura 9. Histograma para la asimetría, junto con su ajuste de normalidad (Ski).

Las muestras se distribuyen ampliamente en lo que respecta a la curtosis (K_G). Tenemos datos que van desde lo platicúrtico en Dzilam (Dz), hasta lo muy leptocúrtico, perteneciente a Sisal (Si) (ver Tabla 2).

Sin embargo, la distribución general de las playas se ubican de lo mesocúrtico a lo leptocúrtico, lo cual indica una buena clasificación para estas playas con excepción de Dzilam (Dz) y Sisal (Si) las cuales, como ya se mencionó, presentan una moderada clasificación (Figura 10).

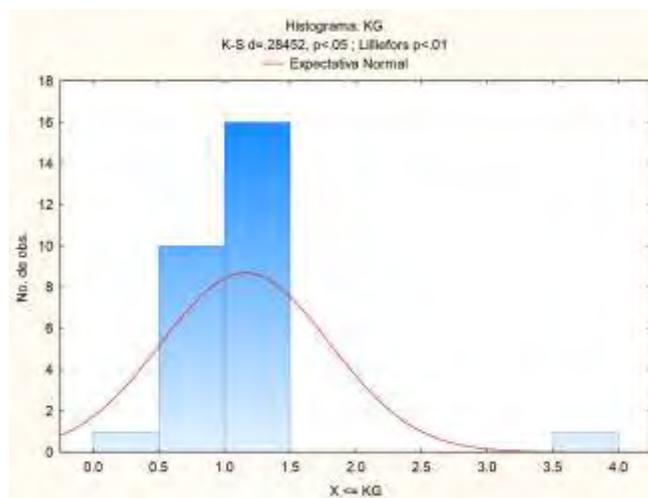


Figura 10. Histograma para la curtosis, junto con su ajuste de normalidad (K_G).

Capítulo 5. Análisis Estadístico.

5.1 Fundamentos numéricos

Para poder comprender la relación que existe entre los SBC y los ETR se requiere llevar a cabo las correlaciones de los parámetros granulométricos con sus respectivas concentraciones en ETR. Para esto, en primaria instancia se requiere un método confiable y práctico para llevar a cabo dicha correlación.

Pensando en variables cuantitativas, el coeficiente de correlación Pearson, es un índice que nos ayuda a medir el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Advertase, que decimos “linealmente”; esto significa que podemos tener variables que no se relacionen de esta manera y que por lo tanto no sea posible desarrollar dicho método. Para estos casos, tendremos que proceder a una regresión lineal (Aitchison, 1986; Swan y Sandilands, 1995). La condición principal para realizar este análisis es que las variables involucradas sigan una distribución normal, en caso contrario se procede a la transformación de las mismas a través de índices logarítmicos (Ln).

En este estudio se verificó la normalidad de los datos por medio de la Prueba Kolmogórov-Smirnov (K-S) (Apendice 1), ya que nos brinda valores más “robustos” para la media que el resto de pruebas y modelos estadísticos (Aitchison, 1986; Swan y Sandilands, 1995; Garzanti, 2016).

Las transformaciones Ln contribuyen a la apertura de datos cerrados a datos abiertos con signos positivos y negativos para una manipulación más confiable en los análisis Pearson.

El coeficiente de correlación Pearson es de fácil interpretación, así como también de fácil ejecución. Se contempla el signo del coeficiente de correlación que va desde -1 a +1. En este sentido, tan robusta es una relación de +1 como de -1.

En el primer caso, a la relación se le conoce como *perfecta positiva* y en el segundo como *perfecta negativa*. Decimos que la correlación entre dos variables pasa a ser perfecta positiva siempre y cuando a medida de que una variable aumente la otra lo hará de la misma manera a una tasa constante. En cambio, cuando tenemos una variable que crece y la otra disminuye, se le conocerá como una relación perfecta negativa, por lo tanto, tendremos que ambas variables pasan a ser funcionalmente exactas (Wonnacott, 1981).

5.2 Geoquímica de ETR.

Los elementos de tierras raras (ETR) son un grupo de 15 elementos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) con número atómico que va del 57 (La) al 71 (Lu). A los elementos con número atómico menor a 63 se les conoce como Tierras Raras Ligeras (por sus siglas en inglés, LREE) y a los posteriores como Tierras Raras Pesadas (HREE).

Son de gran importancia por tener un comportamiento químico similar, es decir, son trivalentes bajo la mayoría de condiciones geológicas, poco solubles y son relativamente inmóviles durante bajos grados de intemperismo, metamorfismo y alteración hidrotermal (Rollingson, 1993; Armstrong-Altrin et al., 2012).

La geoquímica se basó en los organismos más abundantes encontrados en las playas del estado de Yucatán, así como, las muestras que pertenecen a las zonas de infraplaya y mesoplaya por su posible relación con el agua de mar. Los datos se presentan en partes por millón (ppm) y sin normalizar (Tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones de elementos de tierras raras (ETR) en ppm de las playas de Yucatán (n=14). B = Bivalvos; G = Gasterópodos; <LD = abajo del límite de detección.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Di2B	0.604	0.868	0.089	0.323	0.041	0.005	0.024	0.001	0.015	<LD	0.008	<LD	0.006	<LD
Dm2B	0.186	0.273	0.034	0.142	0.028	0.006	0.020	0.001	0.018	<LD	0.009	<LD	0.007	<LD
Sci1B	0.162	0.226	0.024	0.089	0.014	0.002	0.009	<LD	0.008	<LD	0.003	<LD	0.002	<LD
Cbi1B	0.168	0.228	0.023	0.085	0.011	0.001	0.008	<LD	0.006	<LD	0.003	<LD	0.001	<LD
CrilB	0.082	0.087	0.014	0.071	0.012	0.002	0.014	<LD	0.016	<LD	0.010	<LD	0.008	<LD
Ti2B	0.038	0.051	0.005	0.028	0.005	0.001	0.005	<LD	0.003	<LD	0.001	<LD	0.001	<LD
Cxi2B	0.134	0.213	0.024	0.106	0.021	0.004	0.019	<LD	0.020	<LD	0.010	<LD	0.010	<LD
Pi1B	0.022	0.030	0.002	0.016	0.003	0.001	0.002	<LD	0.001	<LD	0.000	<LD	<LD	<LD
Sm2B	0.056	0.077	0.009	0.042	0.008	0.002	0.008	<LD	0.007	<LD	0.003	<LD	0.003	<LD
Promedio	0.161	0.228	0.025	0.100	0.016	0.003	0.012	0.001	0.011	-----	0.005	-----	0.005	-----
Desviación estándar	0.176	0.256	0.026	0.092	0.012	0.002	0.008	0.000	0.007	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000
Límites de confianza	0.11526	0.167348	0.017	0.06034	0.00805	0.00123	0.0049	0.00029	0.00451	0.000	0.0025	0.000	0.0023	0.000
DiG	0.135	0.204	0.026	0.109	0.020	0.004	0.016	0.001	0.014	<LD	0.006	<LD	0.005	<LD
Dm2G	0.088	0.135	0.016	0.066	0.012	0.002	0.009	<LD	0.007	<LD	0.003	<LD	0.002	<LD
Sci1G	0.322	0.518	0.068	0.305	0.065	0.013	0.070	0.009	0.084	<LD	0.050	0.003	0.049	<LD
Cbi1G	0.141	0.190	0.023	0.103	0.021	0.004	0.020	0.001	0.014	<LD	0.006	<LD	0.003	<LD
Ti2G	0.134	0.213	0.024	0.106	0.021	0.004	0.019	<LD	0.020	<LD	0.010	<LD	0.010	<LD
Promedio	0.164	0.252	0.031	0.138	0.028	0.005	0.027	0.004	0.028	-----	0.015	0.003	0.014	-----
Desviación estándar	0.091	0.152	0.021	0.095	0.021	0.004	0.024	0.004	0.032	0.000	0.020	0.001	0.020	0.000
Límites de confianza	0.07967	0.133108	0.018	0.08341	0.0186	0.00374	0.0214	0.00336	0.02766	0.000	0.0174	0.00118	0.0173	0.000

5.3 Restricción de los datos

Para poder llevar a cabo la correlación, se tuvo que ajustar y delimitar el número de variables con los resultados obtenidos en las concentraciones de ETR pertenecientes a bivalvos (n= 9) y gasterópodos (n= 5) (Tabla 3). Las muestras de organismos se separaron manualmente de un total colectado y se analizaron para ETR.

Todas las muestras, con excepción de los resultados obtenidos para el Yb (Iterbio), presentaron una distribución normal (Apendice 1), así como también, se observó un patrón horizontal entre los LREE y HREE (Kasper-Zubillaga et al, 2015). Por lo tanto, se realizó un ajuste mediante la transformación de los datos a índices Ln (Aitchinson, 1986; Kasper-Zubillaga et al, 2007) para observar la significancia de las posibles correlaciones con la granulometría.

Se obtuvieron un total de 28 variables para correlacionar sin tomar en cuenta al Tb (Terbio), Ho (Holmio), Tm (Tulio) y Lu (Lutecio) por sus bajos niveles de detección.

5.4 Resultados de la regresión lineal a partir de la correlación Pearson

Así como nos interesa obtener el coeficiente de correlación, también es necesario determinar si tal valor está relacionado en la realidad o tan sólo se presenta como producto del azar. En otras palabras, necesitamos conocer el nivel de significancia de dicho coeficiente.

Un coeficiente de correlación se dice que es significativo, sí y sólo sí podemos afirmar con cierta probabilidad que es diferente de cero.

Por lo tanto, se nos presentarían dos opciones:

- a) El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero.
- b) El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es diferente de cero.

Desde el supuesto que la distribución de correlaciones sea igual a cero, entonces seguirán una ley de Student con $n-2$ grados de libertad, de media el valor poblacional y desviación tipo:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}$$

Siendo S_r = Error estándar de la regresión lineal.

Es así como, teniendo un cierto coeficiente de correlación (r), se procede a comprobar si dicho coeficiente es igual a cero. Para eso, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentran en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la relación t-student:

$$t = \frac{r-0}{\frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

este resultado se compara con el existente en tablas para un cierto nivel de significancia α y $n-2$ grados de libertad, $t_{(\alpha, n-2)}$ (Wonnacott, 1981). De esta forma nos encontramos nuevamente con dos opciones:

1. $t > t_{(\alpha, n-2)} \Rightarrow$ Rechazamos (a). Por lo tanto, las variables están relacionadas.
2. $t \leq t_{(\alpha, n-2)} \Rightarrow$ Aceptamos (a). Por lo tanto, las variables no están relacionadas.

En la tabla 4 y 5 se muestran los resultados de la Correlación Pearson para bivalvos y gasterópodos, respectivamente. Se puede apreciar una fuerte correlación entre la fracción gruesa y fina junto con su grado de clasificación dentro de los bivalvos. Por otra parte, en los gasterópodos, se observa que la asimetría se encuentra correlacionada con los índices logarítmicos pertenecientes a los ETR, así como también con las fracciones gruesas y medianas.

Tabla 4. Resultados de la correlación pearson pertenecientes a los bivalvos.

	Bivalvos	Mz	σ	Ski	KG	CS	MS	FS	VFS	LN Yb/La	LN Yb/Ce	LN Yb/Pr	LN Yb/Nd	LN Yb/Sm	LN Yb/Eu	LN Yb/Gd	LN Yb/Dy	LN Yb/Er	
Bivalvos	1.00	-0.11	-0.62	-0.16	0.28	-0.25	0.55	0.18	-0.95	0.45	0.31	0.48	-0.08	0.38	0.28	0.17	-0.07	0.08	
Mz		1.00	-0.00	-0.81	0.03	-0.20	0.48	0.70	0.28	0.28	0.31	0.25	-0.75	0.42	0.66	0.52	0.34	-0.00	
σ			1.00	0.36	-0.88	0.71	-0.52	0.27	0.64	-0.56	-0.53	-0.60	0.07	-0.55	-0.36	-0.36	-0.30	-0.39	
Ski				1.00	-0.42	0.39	-0.69	-0.50	0.11	-0.35	-0.49	-0.33	0.37	-0.46	-0.57	-0.54	-0.31	-0.15	
KG					1.00	-0.71	0.27	-0.44	-0.33	0.35	0.32	0.37	0.11	0.36	0.14	0.28	0.26	0.33	
CS						1.00	-0.29	-0.03	0.32	-0.02	-0.55	-0.07	0.32	-0.07	-0.03	0.09	0.08	-0.06	
MS							1.00	0.42	-0.54	0.68	0.78	0.70	-0.31	0.73	0.74	0.65	0.50	0.50	
FS								1.00	-0.06	-0.04	0.25	-0.05	-0.68	0.04	0.35	0.06	-0.18	-0.32	
VFS									1.00	-0.31	-0.44	-0.35	-0.11	-0.24	-0.12	-0.02	0.15	-0.10	
LN Yb/La										1.00	0.28	1.00	-0.21	0.98	0.79	0.92	0.84	0.74	
LN Yb/Ce											1.00	0.33	-0.32	0.38	0.51	0.24	0.23	0.25	
LN Yb/Pr												1.00	-0.22	0.98	0.78	0.89	0.83	0.75	
LN Yb/Nd													1.00	-0.32	-0.60	-0.24	-0.11	0.20	
LN Yb/Sm														1.00	0.88	0.95	0.87	0.69	
LN Yb/Eu															1.00	0.85	0.69	0.36	
LN Yb/Gd																1.00	0.91	0.69	
LN Yb/Dy																	1.00	0.85	
LN Yb/Er																			1.00

Tabla 5. Resultados de la correlación pearson pertenecientes a los gasterópodos.

	Gasterópodos	Mz	σ	Ski	KG	CS	MS	FS	VFS	LN Yb/La	LN Yb/Ce	LN Yb/Pr	LN Yb/Nd	LN Yb/Sm	LN Yb/Eu	LN Yb/Gd	LN Yb/Dy	LN Yb/Er		
Gasterópodos	1.00	0.50	0.82	-0.19	-0.25	0.12	-0.29	-0.26	0.90	-0.22	-0.23	-0.25	-0.24	-0.22	-0.24	-0.20	-0.20	-0.18		
Mz		1.00	0.67	-0.92	0.64	-0.08	0.19	0.59	0.51	0.51	0.51	0.49	0.50	0.51	0.50	0.52	0.56	0.59		
σ			1.00	-0.33	-0.11	0.51	-0.53	-0.16	0.95	-0.27	-0.27	-0.30	-0.29	-0.27	-0.27	-0.24	-0.21	-0.17		
Ski				1.00	-0.86	0.35	-0.49	-0.85	-0.14	-0.77	-0.78	-0.76	-0.76	-0.77	-0.76	-0.77	-0.80	-0.82		
KG					1.00	-0.44	0.75	0.88	-0.26	0.95	0.95	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.97	0.97		
CS						1.00	-0.84	-0.62	0.52	-0.67	-0.68	-0.68	-0.67	-0.66	-0.63	-0.62	-0.60	-0.59		
MS							1.00	0.67	-0.52	0.92	0.92	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.88	0.87		
FS								1.00	-0.39	0.84	0.85	0.84	0.84	0.83	0.82	0.80	0.84	0.84		
VFS									1.00	-0.35	-0.36	-0.38	-0.37	-0.34	-0.35	-0.30	-0.30	-0.27		
LN Yb/La										1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	
LN Yb/Ce											1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	
LN Yb/Pr												1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	
LN Yb/Nd													1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	
LN Yb/Sm														1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	
LN Yb/Eu															1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	
LN Yb/Gd																1.00	1.00	1.00	1.00	
LN Yb/Dy																	1.00	1.00	1.00	
LN Yb/Er																			1.00	1.00

5.5. Significancia analítica en los bivalvos

La correlación entre CS vs σ (ϕ) es de $r = 0.71$ con una prueba t student de $t = 2.67$; $\rho = 0.05$; $n = 9$; $df = 7$, con un valor de $t_{(\alpha, n-2)} = 1.89$ lo cual implica que estas variables son significativas (Apendice 3). Esto también se respalda con los resultados obtenidos en trabajos sedimentológicos de terrígenos con fragmentos de concha como en la costa este del Golfo de California, en algunas playas del Pacífico Mexicano, tres playas del oeste del Golfo de México y la costa de Yucatán (Kasper-Zubillaga et al., 2007; Carranza-Edwards et al., 2009; Kasper-Zubillaga et al., 2013; Kasper-Zubillaga et al., 2015). La naturaleza de los bivalvos de acuerdo a su morfología e incluso con las partes ya fragmentadas o rotas por el oleaje, corrientes, tormentas etc., es el de incorporarse a fracciones más gruesas, medianamente y/o pobremente clasificadas en la arena con alto contenido de conchas (Kasper-Zubillaga et al, 2015) .

La correlación entre tamaño de grano gráfico Mz (ϕ) vs Ln (Yb/Eu) es significativa en bivalvos con $r = 0.66$ con una prueba t-student de $t = 2.32$; $\rho = 0.05$; $n = 9$; $df = 7$; $t_{(\alpha, n-2)} = 1.89$ (Apendice 3). Este resultado se respalda con la baja concentración de Eu en las fracciones carbonatadas de bivalvos que sugiere poca asimilación de este elemento y un posible proceso de diagénesis temprana ej. aragonita transformada a calcita, apoyado por estudios previamente reportados ((Lavoie and Bergeron 1993; Kasper-Zubillaga et al. 2014).

El Eu es un elemento que está condicionado a tener ciertos comportamientos como anomalías positivas y negativas dependiendo del patrón de elementos de tierras raras adyacentes a éste, como son el Sm (Samarium) y Gd (Gadolinio) que de acuerdo a las señales de estos dos elementos marcan la tendencia del Eu de forma “exagerada” en su anomalías (Lawrence et al. 2006). Adicionalmente el ser divalente o trivalente pueden aumentar o disminuir su señales aún cuando son normalizados.

La arena media se correlaciona con el Ln (Yb/Ce) con un valor significativo de $r = 0.78$ al igual que las anteriores pruebas determinadas con la t-student (Apéndice 3). Al aumentar la arena media constituida por fragmentos de bivalvos, gasterópodos, y en menor porcentaje restos de otros organismos calcáreos el Ce disminuye al igual que el Eu por las mismas razones antes expuestas como que los elementos adyacentes al Ce; el La (Lantano) y Pr (Praseodimio) tienen señales peculiares que influyen en el aumento o disminución del Ce sin que haya una anomalía real del Ce como se ha reportado en varios estudios provocando cierto “ruido” (Lawrence et al. 2006; Kamber et al, 2005; Kasper-Zubillaga et al, 2015).

5.6 Significancia analítica en los gasterópodos.

Se discute la fracción muy fina (%) vs la clasificación σ (Φ) con $r= 0.95$, t-student de 5.27 y con una $t_{(\alpha, n-2)} = 2.35$, $p= 0.05$; $n= 5$; $df= 3$. Esta correlación significativa implica que la fracción fina biógena (%) está mejor clasificada como ya se ha reportado en varios estudios en ambientes de playa y duna mencionados anteriormente. Esto se relaciona con el fenómeno de la selectividad del viento para depositar fracciones finas, la deflación como transporte de partículas más ligeras y la variedad de tamaño en las fracciones que constituyen la arena carbonatada.

La correlación de arena media con Ln Yb/Eu en gasterópodos es de $r= 0.91$ con una prueba significativa t-student mayor que la observada en bivalvos aunque con las siguientes limitantes: a) número de muestras menor en gasterópodos comparadas con los bivalvos, b) menor fracción en gramos en los gasterópodos que en bivalvos debido a su menor concentración en la arena (Kasper-Zubillaga et al, 2015) y c) el efecto de disolución de las tierras raras en carbonatos posiblemente por el tiempo de permanencia de las tierras raras en el agua marina.

La correlación de arena media vs Ln Yb/Ce es de $r= 0.93$ con una significancia ya determinada anteriormente con la prueba t-student (ver Apéndice 2). Al igual que con los bivalvos, encontramos que el Ce no se incorpora al carbonato, así como también expone el problema de los elementos adyacentes que no muestran posiblemente la anomalía “real” de este elemento. Sin embargo esto es una aseveración que responde exclusivamente a lo reportado por los autores que han estudiado al Ce en organismos carbonatados.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Correlaciones para bivalvos.

1.- La correlación entre CS vs σ (ϕ) es significativa, lo cual indica que de acuerdo a la morfología de los bivalvos junto con sus partes fragmentadas o rotas por el oleaje, se incorporan a fracciones más gruesas con lo que obtenemos arenas moderadas y/o pobremente clasificadas con un alto contenido de conchas.

2.- La correlación entre tamaño de grano gráfico Mz (ϕ) vs Ln (Yb/Eu) es significativa en los bivalvos. La correlación sugiere la baja concentración de Eu en las fracciones carbonatadas de bivalvos debido posiblemente a la poca asimilación de este elemento y un posible proceso de diagénesis temprana ej. proceso de calcitización.

3.- La arena media se correlaciona con el Ln (Yb/Ce). La arena media formada por fragmentos de bivalvos, gasterópodos y otros biógenos sugiere que el Ce disminuye al igual que el Eu por las mismas razones antes expuestas, es decir, los elementos adyacentes al Ce; ej La (lantano) y Pr (praseodimio) tienen señales peculiares que influyen en el aumento o disminución del mismo sin que haya una anomalía, como se ha reportado en varios estudios, provocando cierto “ruido”.

6.2 Correlaciones para gasteropodos.

1.- La correlación de la VFS (%) vs la clasificación σ (Φ) sugiere que la fracción fina biógena (%) tiene una mejor clasificación que se respalda por otros estudios en ambientes de playa y duna. El fenómeno de la selectividad del viento para depositar fracciones finas, la deflación y la variedad de tamaño en las fracciones que constituyen la arena carbonatada son procesos que explican esta correlación.

2.- La correlación de arena media con Ln Yb/Eu en gasterópodos es significativa. Existen algunas limitantes en este análisis: a) número de muestras menor en gasterópodos comparadas con los bivalvos, b) menor fracción concentrada en gramos de los gasterópodos en comparación con los bivalvos, debido a una acumulación limitante en la arena y c) el efecto de disolución de las tierras raras en carbonatos posiblemente por el tiempo de residencia de las tierras raras en el agua de mar.

3.- La correlación de arena media vs Ln Yb/Ce es de $r= 0.93$, lo cual es significativa en los gasterópodos. El Ce no se incorpora al carbonato de los gasterópodos y los elementos adyacentes no muestran una posible anomalía “real” de este elemento. Sin embargo esto es una aseveración que responde exclusivamente a lo reportado por los autores que han estudiado al Ce en organismos carbonatados.

Referencias Bibliográficas e Internet.

- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS). **Atlas Climático Digital de México**. (Consulta: 14-09-2014) <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>
- Aitchison, J., 1986. **The Statistical Analysis of Compositional Data**. Chapman and Hall, London - New York, XII, 416 p.
- Aguayo - Camargo, J. E., 1978. **Sedimentary environments and diagenesis of a Cretaceous reef complex, eastern Mexico**. UNAM, ICMyL, Anales, Volumen 5 (1): 83-140.
- Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Lee, Y. I., Kasper-Zubillaga, J. J. y Córdoba-Saldaña, L. P., 2014. **Geochemistry of sands along the San Nicolas and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: implications for provenance and tectonic setting**. Turkish Journal of Earth Sciences. V.23: 1-26.
- Back, W. y Lesser, J. M., 1981. **Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico**. Journal of Hydrology. Volume 51, Issues 1-4: 119-130.
- Bernhard, J. M., Edgcomb, V. P., Visscher, P. T., McIntyre-Wressnig, A., Summons, R. E., Bouxsein, M. L., ... y Jeglinski, M., 2013. **Insights into foraminiferal influences on microfabrics of microbialites at Highborne Cay, Bahamas**. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(24): 9830-9834.

- Byrne R.H. y Sholkovitz E.R., 1996. **Marine chemistry and geochemistry of the lanthanides**. Gschneidner KA Jr, Eyring L (eds). Handbook on the physics and chemistry of rare earths. El Sevier, Amsterdam: 497–593.
- Carranza, E. A. y Caso, M., 1994. **Zonificación del perfil de playa**. Geo-UNAM, 2 (2): 26-32.
- Enríquez, C., I.J. Mariño-Tapia, y J.A. Herrera-Silveira. 2010. **Dispersion in the Yucatan coastal one: Implications for red tide events**. Continental Shelf Research 30: 127–137.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2010. **Principales resultados por localidad, 2010**.
- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., y Zavala-Hidalgo, J., 1992. **Oceanografía Física, 2 (Masas de agua y mareas de los mares mexicanos)**. Atlas Nacional de México, (Sheet IV.9.2., Winter). Inst. de Geografía, UNAM.
- Fleet, A. J., 1989. **Rare Earth Element Geochemistry**. El Sevier. P. Henderson, Amsterdam, The Netherlands. 343-373 p.
- Folk, R. L., 1980. **Petrology of the Sedimentary Rocks**. Hemphill Publishing Company. Austin, Texas. 179 p.
- Folk, R. L y Ward, W. C., 1957. **Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters**. Journal of the Sedimentology Petrology. Vol. 27. (1): 3-26.
- Horta-Puga G, y Carriquiry J. D., 2012. **Coral Ba/Ca molar ratios as a proxy of precipitation in the northern Yucatan Peninsula, Mexico**. Applied Geochemistry 27: 1579-1586.

- Inman, D. L. y Frautschy, J. D., 1966. **Littoral processes and development of shorelines.** *Proceedings of the Coastal Engineering Specialty Conference*, ASCE, New York. 511- 536 p.
- Johannesson H. K., Doyle L., Hawkins D. L. Jr. y Cortes, A., 2007. **Do Archean chemical sediments record ancient seawater rare earth element patterns?** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 871–890.
- Jupiter, S.D., 2008. **Coral rare earth element tracers of terrestrial exposure in nearshore corals of the Great Barrier Reef.** *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium Ft. Lauderdale, Florida USA.* 102-106 p.
- Kasper-Zubillaga J.J., Acevedo-Vargas, B., Morton-Bermea O. y Ortiz-Zamora, G. 2008b. **Rare earth elements of the Altar Desert dune and coastal sands, northwestern México.** *Chemie Der Erde-Geochemistry.* V. 68: 45-59.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E., Armstrong-Altrin, J.S. y Sial, A.N. 2015. **A study of carbonate beach sands from the Yucatan Peninsula, Mexico.** *Carbonates and Evaporites.* 1-12.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J. S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., Lozano-Santa Cruz, R. 2013. **Control in Beach and Dune Sands of the Gulf of Mexico and the Role of Nearby Rivers.** *International Journal of Geosciences.* V.4: 1157-1174 p.

- Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J. S. y Rosales-Hoz, L., 2014. **Geochemical study of coral skeletons from the Puerto Morelos Reef, southeastern Mexico.** Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 151, 78: 87.
- Kasper-Zubillaga J.J., Carranza Edwards A. y Morton-Bermea O. 2008b. **Heavy minerals and rare earth elements in coastal and inland dune sands of El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico.** Marine Georesources and Geotechnology V 26: 172-188.
- Kasper-Zubillaga J.J., Ortiz-Zamora, G.V., Dickinson WW, Urrutia-Fucugauchi J. y Soler-Arrechalde A.M. 2007. **Textural and compositional controls on modern beach and dunesands, New Zealand.** Earth Surface Processes and Landforms. V.32, 32: 366–389.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz, L., y Bernal, J.P., 2010. **Rare earth elements in corals from the Isla de Sacrificios Reef, Veracruz, Mexico.** Chemie der Erde. V.70: 55-60 p.
- Komar, P. D., 1976. **Oregon Coast Shoreline Changes Due to Jetties.** Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division, Vol. 102, No. 1: 13-30.
- Komar, Paul D. y Wang, Chi., 1984. **Processes of Selective Grain Transport and the Formation of Placers on Beaches.** The Journal of Geology. Vol. 92, No. 6: 637-655.
- Komar, P. D. y Inman D. L., 1970. **Longshore sand transport on beaches.** Journal of Geophysical Research. Volume 75 (30): 5914–5927.

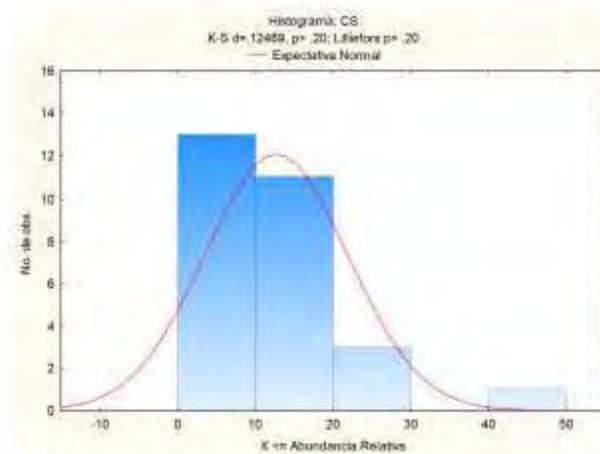
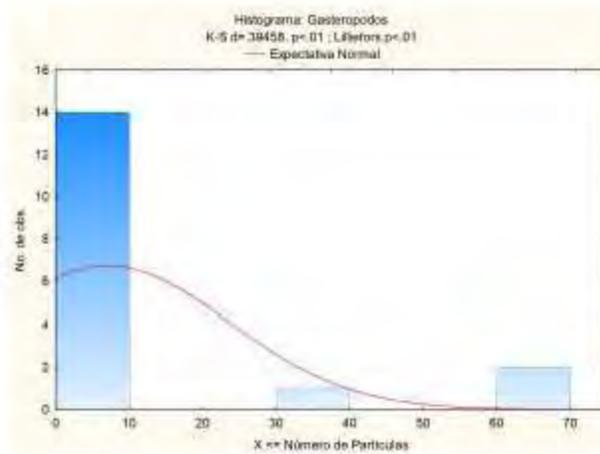
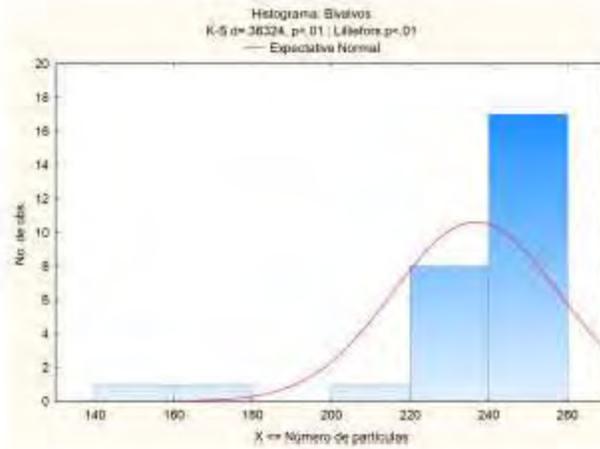
- Lavoie D. y Bergeron M., 1993. **REE patterns as a tool for recognition of diagenetic beds: a case from the Lower Devonian Upper Gaspé Limestones, Gaspé Peninsula, Québec**, Journal of the Atlantic Geoscience Society / Atlantic Geology : revue de la Société Géoscientifique de l'Atlantique 29: 51-60.
- Lawrence M.G., Greig A., Collerson K.D. y Kamber B.S., 2006. **Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways**. Aquatic Geochemistry 12: 39–72.
- Lopez-Ramos, E., 1983. **Geología de México (tercera edición)**. UNAM. 263-293. Tomo III.
- Mange, M.A. y Otvos, E.G., 2005. **Gulf coastal plain evolution in West Louisiana: heavy mineral provenance and Pleistocene alluvial chronology**. Sedimentary Geology 182 (1–4): 29–57.
- McLaren, P., 1981. **An Interpretation of trends in grain-size measures**. Journal of the Sedimentary Petrology. Vol. 51 (2): 611-654.
- Meneses, G. J., 1980. **Geología de la Sonda de Campeche**. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Volumen 32 (1): 1-26.
- Murray, R.W., Buchholtz T. B., Marilyn R., Gerlach, D.C., Price Russ III, G., Jones, D.L., 1991. **Rare Earth, mayor, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterrey Group, California: Assesing REE sources to fine-grained marine sediments**. Geochimica et Cosmochimica Acta. V. 55: 1875-1895.

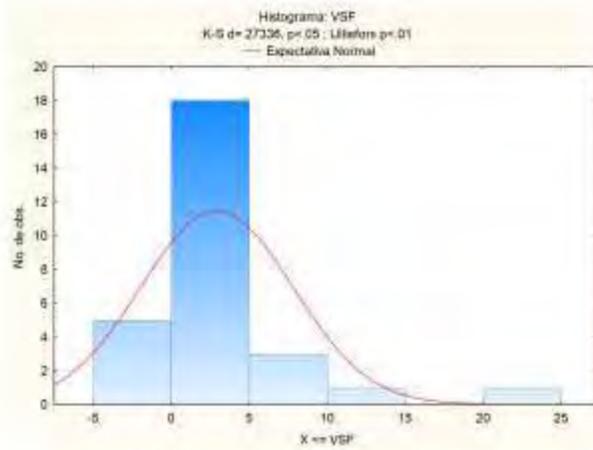
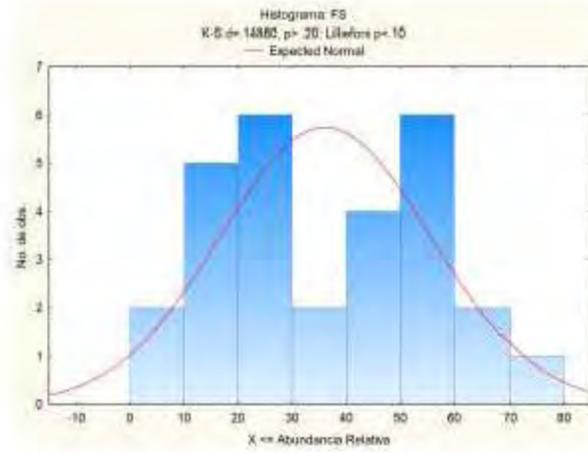
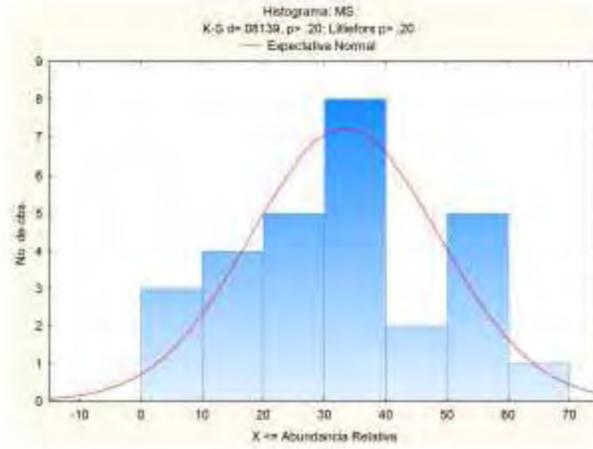
- Nolasco-Montero, E. y Carranza-Edwards, A., 1988. **Estudio sedimentológico regional de playas de Yucatan y Quintana Roo, Mexico.** An. Inst. Cienc. de l Mar y Limnol., UNAM, 15(2): 49-66.
- Perry E.C. y Velazquez-Oliman G., 1996. **The hydrogeology of the northern Yucatan Peninsula, Mexico, with special reference to coastal processes: LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone).** Ground Water Discharge in the Coastal Zone, in Proceedings of an International Symposium, Buddemeier, R.W., ed., 179: 92-97.
- Olivier, N., y Boyet, M., 2006. **Rare earth and trace elements of microbialites in Upper Jurassic coral – and sponge – microbialites reefs.** Chemical Geology. Acta 230: 105-123.
- Pérez-Villegas, G., 1990. **Viento dominante durante el año (IV 4.2):** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, IV Naturaleza, 4. Clima, escala: 1:4,000,000, mapa.
- Pettijohn, F. J., 1975. **Sedimentary rocks.** Harper & Row Limited. Universidad de California. 628 p.
- Potter, P. E., 1994. **Modern sands of South America: composition, provenance and global significance.** Volume 83, Issue 1: 212-232 p.
- Reeve A. y Perry, E. C., 1990. **Aspects and tidal analysis along the western north coast of the Yucatan Peninsula, Mexico.** AWRA International Symposium on Tropical Hydrogeology, San Juan, Puerto Rico.
- Rollinson, H., 1993. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation.** Pearson, 325 p.

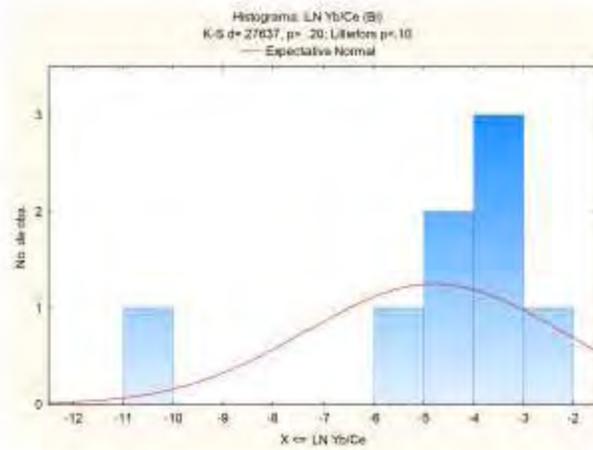
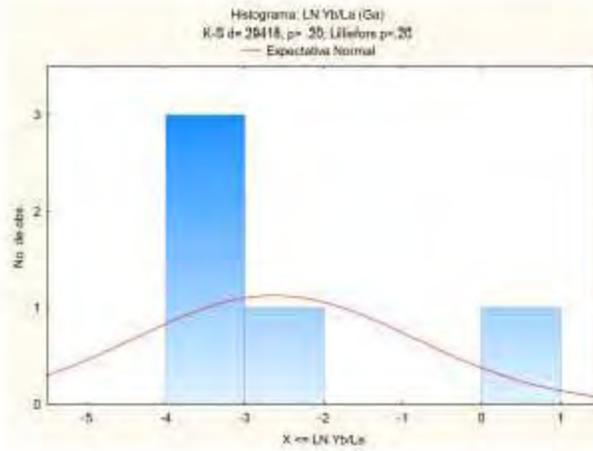
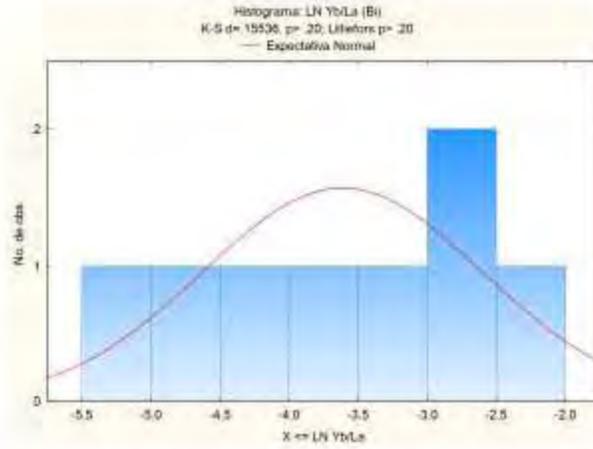
- Sholkovitz, E.R., 1995. **The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries.** Aquatic Geochemistry 1: 1–34.
- Servicio Geológico Mexicano. **Carta Calkiní F-15-9-12.** 2005
- Servicio Geológico Mexicano. **Carta Tizimin F16-7.** 2005
- Shepard, F. P., 1973. **Submarine Geology.** Harper and Row. New York. 517 p.
- Swan P.R.H. y Sandilands M., 1995. **Introduction to geological data analysis.** Blackwell, Oxford. 446 p.
- Ward, P. E. y Wilson, J. L., 1974. **Field Trip 2,** Annual Meeting of the Geol. Soc. of America General aspect of the Northeastern coast of the Yucatan Peninsula. Acta 23: 226-238.
- Ward, W.C., y Weidie, A.E., 1978. **Geology and hydrogeology of northeastern Yucatan.** New Orleans Geological Society. New Orleans, LA. 1-19.
- Webb, G.E y Kamber, B.S., 2000. **Rare earth elements in Holocene reef microbialites: a new shallow sea water proxy.** Geochimica Cosmochimica Acta 64: 1557-1565.
- Wonnacott, T. H. y Wonnacott, R. J. 1981. **Regression: a second course in statistics.** New York: Wiley.

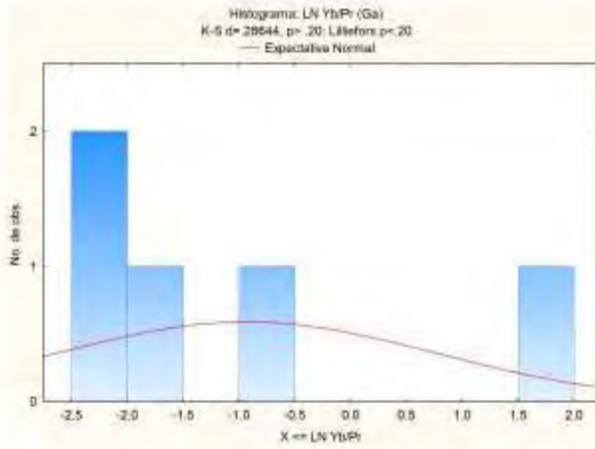
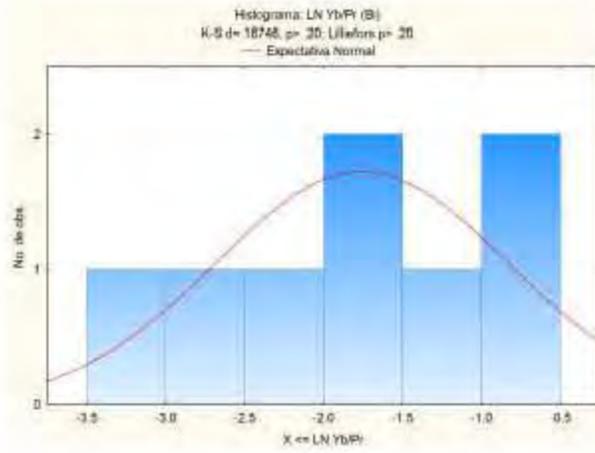
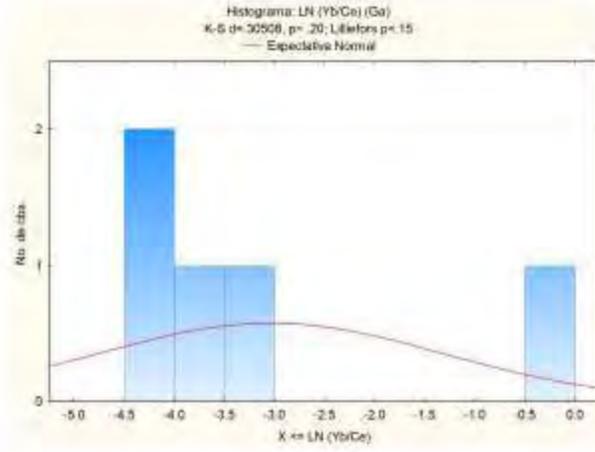
Apéndices.

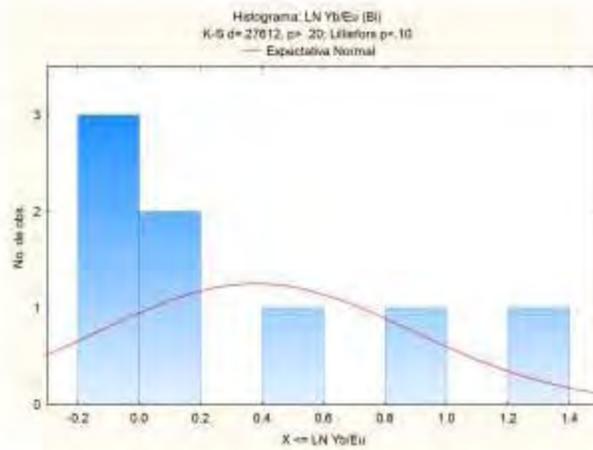
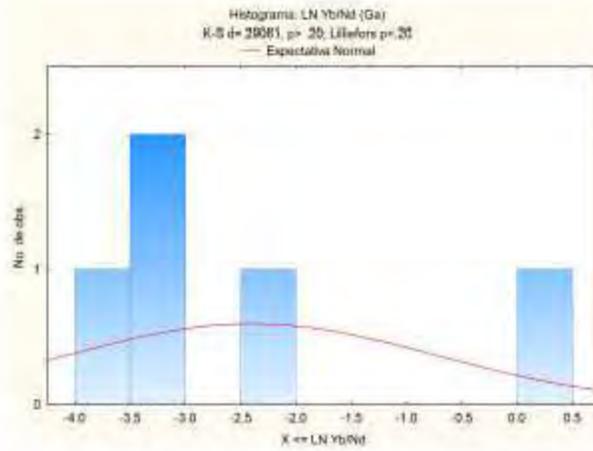
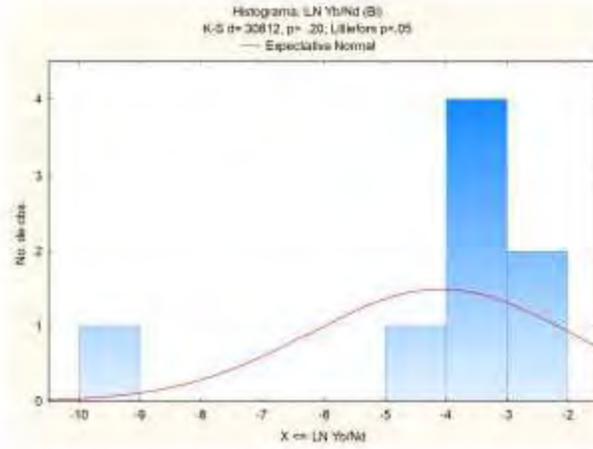
Apéndice 1: Histogramas con sus pruebas K-S, Lilliefors y su expectativa normal para cada una de las variables involucradas.

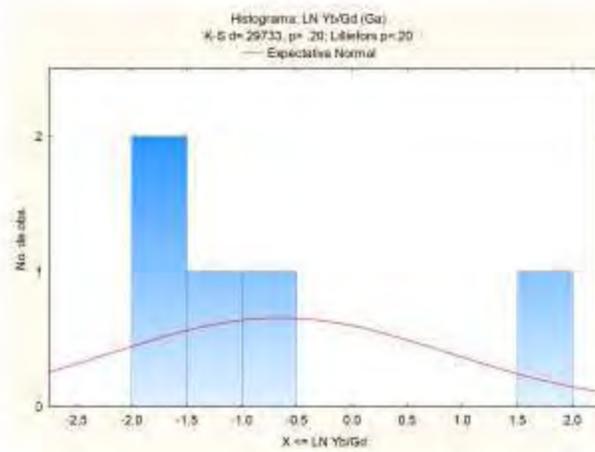
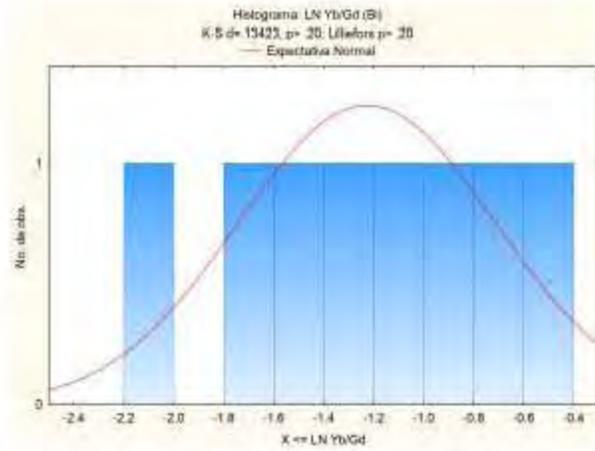
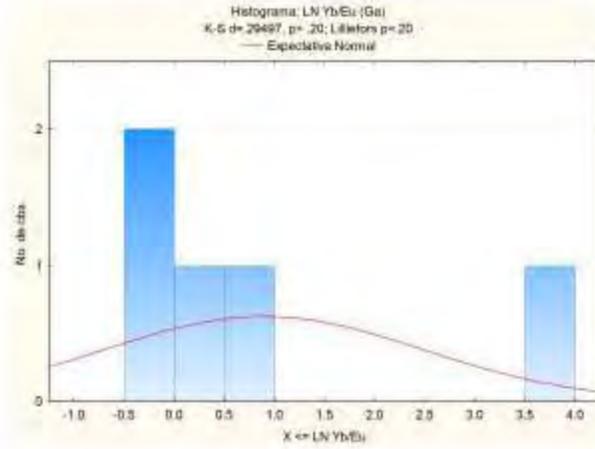


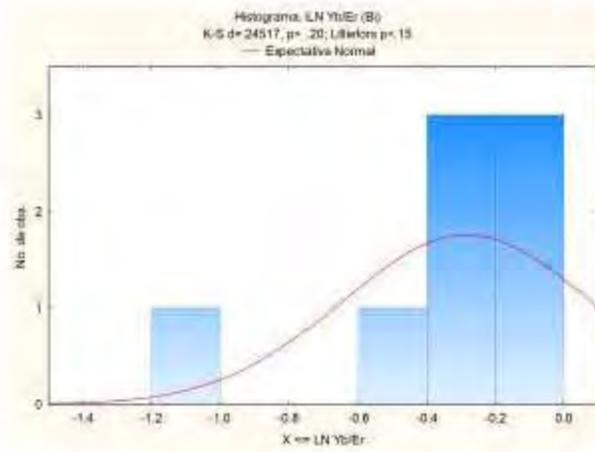
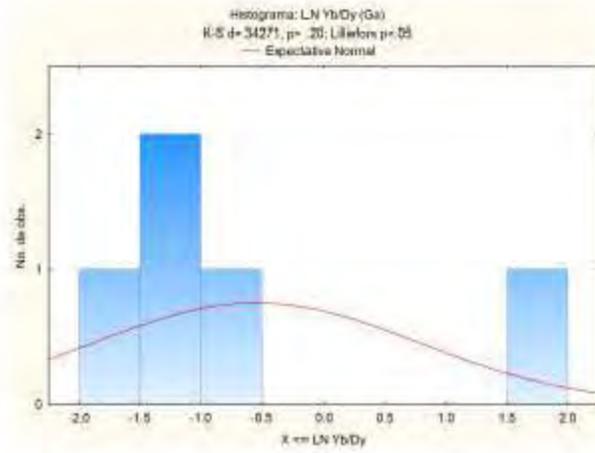
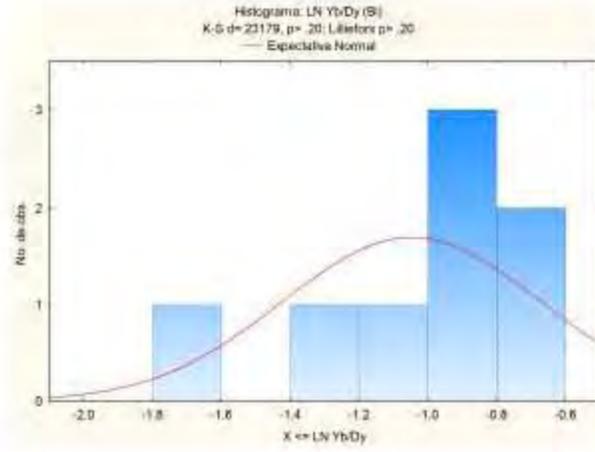


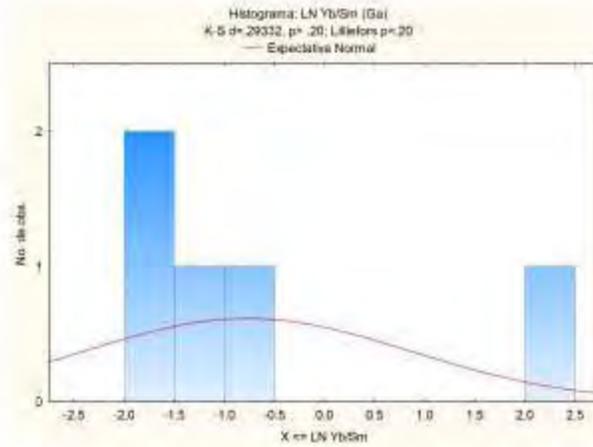
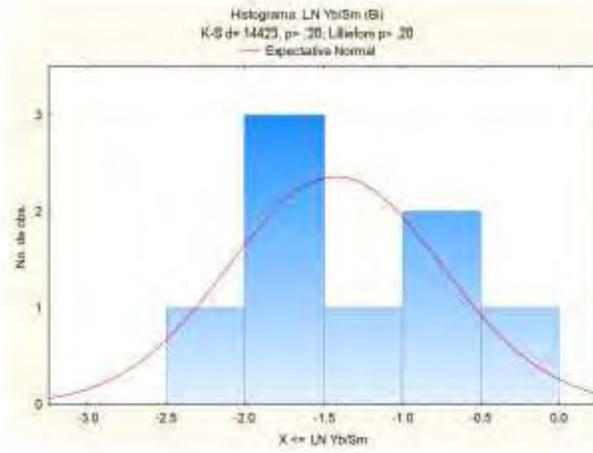
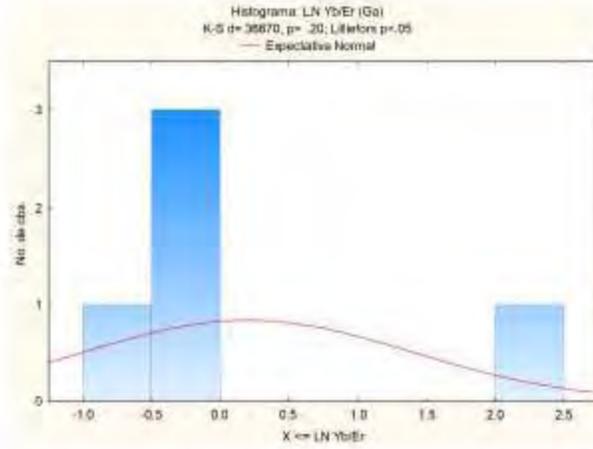










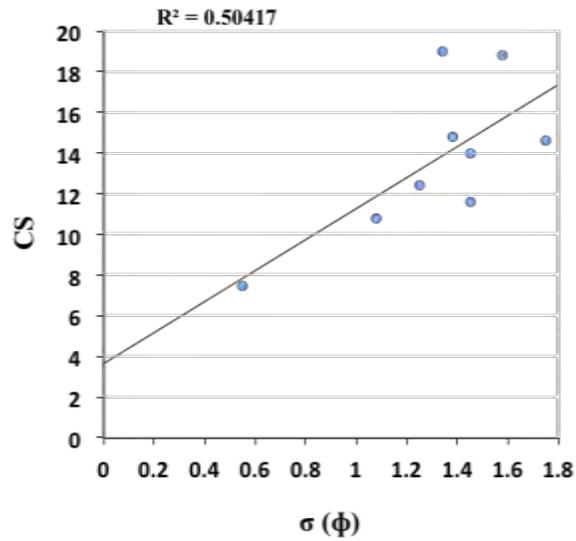


Apéndice 2: Nivel de significancia (T-student).

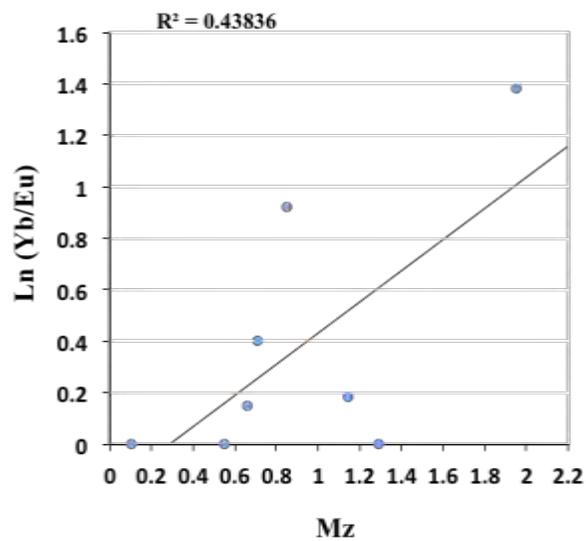
Correlación	t	t (0.05, 7)
Bivalvos / σ	-2.09	1.895
Bivalvos / VFS	-8.05	1.895
Mz / Ski	-3.65	1.895
Mz / LN (Yb/Nd)	-3.00	1.895
Mz / LN (Yb/Eu)	2.32	1.895
σ / KG	-4.90	1.895
σ / CS	2.67	1.895
σ / VFS	2.20	1.895
σ / LN (Yb/Pr)	-1.98	1.895
Ski / MS	-2.52	1.895
Ski / LN (Yb/Eu)	-1.84	1.895
KG / CS	-2.67	1.895
MS / LN (Yb/La)	2.45	1.895
MS / LN (Yb/Ce)	3.30	1.895
MS / LN (Yb/Sm)	2.83	1.895
MS / LN (Yb/Eu)	2.91	1.895
FS / LN (Yb/Nd)	-2.45	1.895

Correlación	t	t (0.05, 7)	Correlación	t	t (0.05, 3)
Gasteropodos / σ	2.48	2.353	KG / LN (Yb/Er)	6.91	2.353
Gasteropodos / VFS	3.58	2.353	CS / MS	-2.68	2.353
Mz / Ski	-4.07	2.353	CS / FS	-1.37	2.353
Mz / KG	1.44	2.353	CS / LN (Yb/La)	-1.56	2.353
Mz / FS	1.27	2.353	CS / LN (Yb/Ce)	-1.61	2.353
σ / VFS	5.27	2.353	CS / LN (Yb/Pr)	-1.61	2.353
Ski / KG	-2.92	2.353	CS / LN (Yb/Nd)	-1.56	2.353
Ski / FS	-2.79	2.353	CS / LN (Yb/Sm)	-1.52	2.353
Ski / LN (Yb/La)	-2.09	2.353	MS / FS	1.56	2.353
Ski / LN (Yb/Ce)	-2.16	2.353	MS / LN (Yb/La)	4.07	2.353
Ski / LN (Yb/Pr)	-2.03	2.353	MS / LN (Yb/Ce)	4.07	2.353
Ski / LN (Yb/Nd)	-2.03	2.353	MS / LN (Yb/Pr)	4.38	2.353
Ski / LN (Yb/Sm)	-2.09	2.353	MS / LN (Yb/Nd)	4.07	2.353
Ski / LN (Yb/Eu)	-2.03	2.353	MS / LN (Yb/Sm)	4.07	2.353
Ski / LN (Yb/Gd)	-2.09	2.353	MS / LN (Yb/Eu)	3.80	2.353
Ski / LN (Yb/Dy)	-2.31	2.353	MS / LN (Yb/Gd)	3.80	2.353
Ski / LN (Yb/Er)	-2.48	2.353	MS / LN (Yb/Dy)	3.21	2.353
KG / MS	1.96	2.353	MS / LN (Yb/Er)	3.06	2.353
KG / FS	3.21	2.353	FS / LN (Yb/La)	2.68	2.353
KG / LN (Yb/La)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Ce)	2.79	2.353
KG / LN (Yb/Ce)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Pr)	2.68	2.353
KG / LN (Yb/Pr)	4.77	2.353	FS / LN (Yb/Nd)	2.68	2.353
KG / LN (Yb/Nd)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Sm)	2.58	2.353
KG / LN (Yb/Sm)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Eu)	2.48	2.353
KG / LN (Yb/Eu)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Gd)	2.31	2.353
KG / LN (Yb/Gd)	5.27	2.353	FS / LN (Yb/Dy)	2.68	2.353
KG / LN (Yb/Dy)	6.91	2.353	FS / LN (Yb/Er)	2.68	2.353

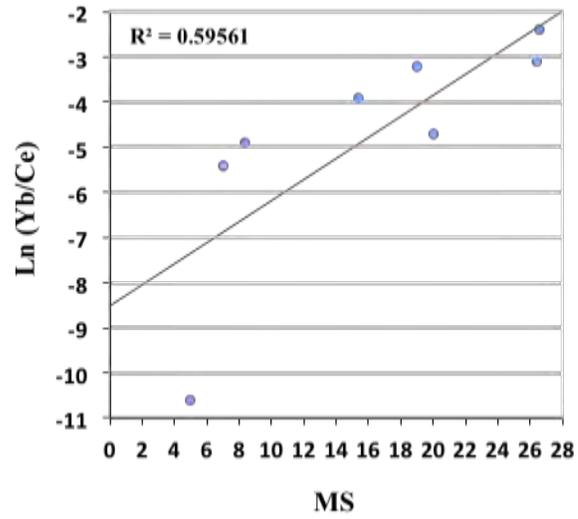
Apéndice 3. Gráficos de tendencia de las correlaciones más significativas pertenecientes a los bivalvos y gasteropodos.



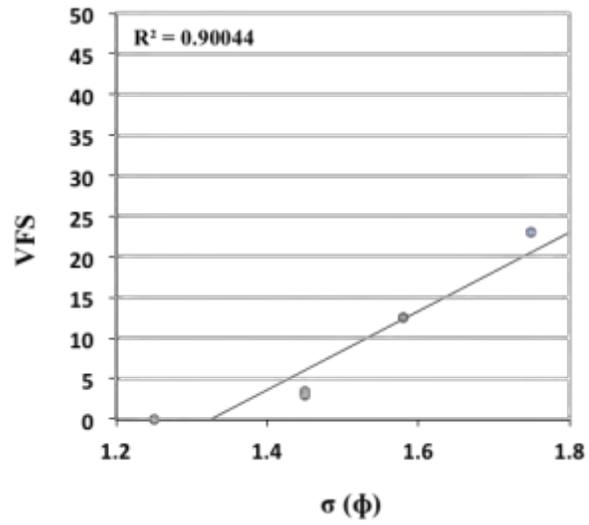
Correlación $\sigma (\phi)$ vs. CS (%) en bivalvos.



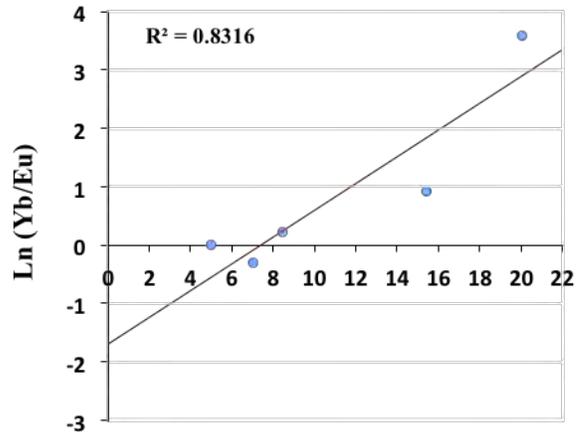
Correlación Mz (ϕ) vs. $\ln (Yb/Eu)$ (ppm) en bivalvos.



Correlación MS (%) vs. Ln (Yb/Ce) (ppm) en bivalvos.

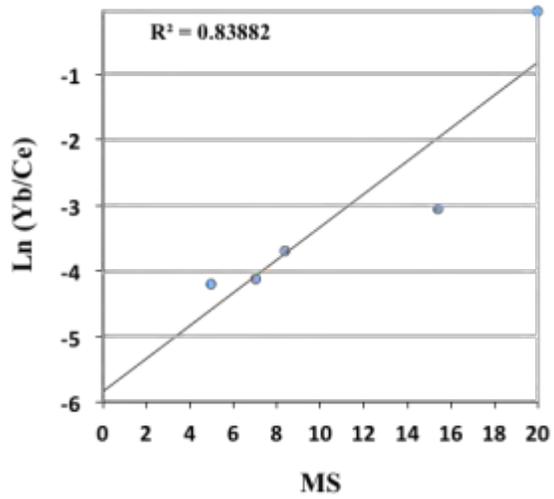


Correlación $\sigma (\phi)$ vs. VFS (%) en gasterópodos.



MS

Correlación MS (%) vs. Ln (Yb/Eu) (ppm) en gasterópodos.



MS

Correlación MS (%) vs. Ln (Yb/Ce) (ppm) en gasterópodos.