

# **Evaluación de la variación de condiciones medioambientales en corales mediante la medición del parámetro susceptibilidad magnética en un ejemplar de *Siderastrea Siderea* en el complejo arrecifal de Isla Fuerte**

*Maria Camila Escobar-Gomez<sup>1</sup>. Jose Fernando Duque-Trujillo<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

## **Resumen**

Este trabajo busca aplicar la susceptibilidad magnética (SM) como metodología para la estimación de la presencia de partículas magnéticas en la estructura de un espécimen del coral *Siderastrea siderea*, extraído del complejo arrecifal de Isla Fuerte en el año 2005. Para ello se realizaron mediciones de SM con un susceptibilímetro MS3 de Bartington Instruments Ltd., conectado a un sensor de registro de núcleo MS2E. Las mediciones se realizaron sobre 2 lajas del coral, cada 5 mm desde la base hasta el techo, recorriendo una distancia total de 60 y 72 cm. Las lajas de coral fueron sometidas a luz ultravioleta para obtener una cronología aproximada del coral por medio de la medición del espesor de las bandas oscuras y las brillantes. Determinando así que el registro en las lajas equivale a ~ 127 años.

Los resultados de SM varían de una laja a otra laja, principalmente debido a los bajos valores de susceptibilidad registrados en el coral, los cuales son principalmente debidos a materiales terrígenos asimilados por el coral. Sin embargo, los resultados permitieron establecer diversas hipótesis acerca de la variación de los contenidos de estos materiales terrígenos en el coral. Concluyendo entonces que esta metodología puede emplearse en futuros estudios para medir el aporte de materiales terrígenos sobre comunidades coralinas actuales o antiguas.

## 1. Introducción

La susceptibilidad magnética es una herramienta utilizada para diversos estudios como marcadores ambientales, determinación de la composición física de las rocas, estudios del medio ambiente para determinar fuentes de contaminación e incluso indicadores de cambio climático. Estas mediciones tienen un grado de sensibilidad capaz de detectar partículas magnéticas en bajas concentraciones por lo cual existen diversas señales ambientales donde suelen ser aplicadas estas técnicas magnéticas, como lo son los sedimentos marinos, sedimentos fluviales, muestras de suelo, líquenes, musgo, hojas o cualquier otro elemento con la capacidad de incorporar en su estructura partículas magnéticas que sirvan como indicadores ambientales (Chaparro, 2006).

Actualmente, se cuentan con estudios de medición de susceptibilidad magnética (SM) sobre plataformas calcáreas antiguas, por ejemplo, se realizaron mediciones de SM para un análisis sedimentológico clásico en una Formación en Bélgica, correlacionando la petrografía con la SM (Da Silva et al., 2002); además se cuenta con un estudio magnético de trampas de sedimentos a lo largo de un arrecife de coral en Molokai, Hawaii (Bothner et al., 2006), para determinar la fuente de los sedimentos de acuerdo con la composición de estos. Otro estudio similar se realizó en Kauai (Isla de Hawaii) donde se usaron propiedades magnéticas para caracterizar la escorrentía terrestre por medio de trampas de sedimentos, durante periodos secos y de inundaciones con el fin de identificar las posibles fuentes de escorrentía (Takesue et al., 2009). Sin embargo, no existe en la literatura un estudio específico con mediciones de perfiles de SM sobre la superficie de las lajas de un coral.

Se ha comprobado que los sedimentos en suspensión son una de las principales causas de estrés en los corales, generando disminuciones considerables en dichos ecosistemas (McLaughlin, et al., 2003). Esta problemática parte en gran

medida por la deforestación lo cual ocasiona la erosión fluvial y esto genera un aumento considerable de los sedimentos en suspensión. El aumento de los sedimentos repercute en los ecosistemas coralinos generando turbidez en el agua y/o disminución en la luz, disminución de la salinidad, variación de los nutrientes y del sustrato; teniendo en cuenta que los corales viven bajo condiciones de aguas cristalinas para poder realizar su fotosíntesis, niveles de salinidad altos y sobre todo sustratos rígidos donde puedan crecer las colonias firmemente. Por esto, el presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de los sedimentos fluviales del Río Sinú en la estructura del coral *Siderastrea Sidera* de Isla Fuerte, a partir de las gráficas de susceptibilidad magnética y las bandas fluorescentes.

## **2. Área de Estudio**

El área de estudio se encuentra localizada en la parte centro-sur de la plataforma continental del Caribe Colombiano. La isla, Isla Fuerte (9° 23'N - 76° 11'W), está ubicada a 11 km de la línea de costa frente al Departamento de Córdoba, al sur del Golfo de Morrosquillo, sin embargo, corresponde a un corregimiento de la Ciudad de Cartagena (Fig. 1). Ocupa un área de 13 km<sup>2</sup> de los cuales 3.25 km<sup>2</sup> se encuentran emergidos a una altura máxima de 12m (Anderson, 1971). Esta isla hace parte de un conjunto de islas que se prolonga 100 km entre Cartagena e Isla Fuerte (Díaz et al., 1996) a lo largo de la plataforma continental siguiendo el lineamiento característico de las estructuras geológicas que se presentan en el Mar Caribe.

La plataforma continental del Caribe colombiano se encuentra cerca de la unión de las placas tectónicas del Caribe, Nazca y Suramérica. Está enmarcada por procesos tectónicos de convergencia de placas, los cuales se manifiestan en forma de diapirismo arcilloso; y por la alta sedimentación que aportan los ríos que desembocan en el mar Caribe como el Río Magdalena siendo este el que mayor sedimentos aporta al Mar Caribe seguido por los ríos Sinú y Atrato (Restrepo et

al., 2006) . La tectónica y la sedimentación son los principales procesos causales del diapirismo que se presenta en la zona, determinando la morfología de la plataforma continental, que se caracteriza por la presencia de domos causados por diapirismo de lodo y la distribución de sedimentos sobre esta (Verne, 1989; Duque-Caro, 1980). Este diapirismo, presente en la zona de estudio, es el factor más importante de deformación, generando la elevación de las islas, siendo estos considerados como episodios orogénicos (Duque-Caro, 1984). Isla Fuerte es una pequeña plataforma calcárea cuya dirección de eje es de 30°N (INVEMAR, 2000), siendo un domo diapírico, donde el área emergida es el resultado de formaciones calcáreas que se dieron durante el Pleistoceno y la primera mitad del Holoceno (Díaz et al., 1996).

Las grandes descargas de sedimentos fluviales y de agua dulce sobre el mar tiene gran impacto en las comunidades coralinas (Restrepo et al., 2006) causando deterioro (enfermedades) y mortandades masivas; los corales son reemplazados por algas, dando paso a un proceso de transición en el paisaje submarino de predominio coralino a predominio vegetal (Díaz et al., 2000). Los sedimentos en suspensión o depositados presentan efectos negativos sobre los corales. Entre estos , el aumento de la turbidez de las aguas y la modificación del tipo de sustrato, los cuales perjudican directamente la disponibilidad de luz y de nutrientes, afectando así la distribución de los ecosistemas coralinos (McLaughlin et al., 2003). El porcentaje restante de coral muerto se atribuye principalmente a factores como: (1) descargas de agua dulce, que generan blanqueamiento en los corales, (2) carga de sedimentos y nutrientes, que aumenta la capacidad de reproducción de las macroalgas que compiten con los corales por sustratos bentónicos y (3) el aumento de la contaminación antropogénica con sustancias tóxicas y aguas residuales, que generan turbidez en las aguas marinas (Díaz et al., 1996; Garzón-Ferreira et al., 2001). Sin embargo, para Isla Fuerte no existe un diagnóstico de las principales consecuencias sobre el arrecife de coral (Quiceno,

2008), pero estos corales no son ajenos a los factores antrópicos y naturales debido a la presencia del Río Sinú, siendo este el segundo río que más sedimentos transporta al Mar Caribe después del Río Magdalena.

Los arrecifes de Isla Fuerte pertenecen al complejo arrecifal de Isla Fuerte-Bajo Bushnell y Burbujas, que ocupan un área de formaciones coralinas vivas recientes de 16,6 km<sup>2</sup> y hacen parte de los complejos arrecifales continentales de tipo arrecifes franjeantes, arrecifes de parche, bancos coralinos y arrecifes de borde de plataforma insular (INVEMAR, 2000).

En relación con la composición arrecifal, hacia el occidente de la isla existe una terraza calcárea que se extiende 2 km hacia el W, compuesta por algas calcáreas, corales costosos y ortocorales; la vertiente oeste de la terraza, que se extiende hasta los 30 m de profundidad, presenta un desarrollo coralino dominado por la presencia de corales mixtos (*Montastraea cavernosa*, *M. franksi*, *Colpophyllia natans* y *Diploria labyrinthiformis*). Posteriormente continúa una zona de *Agaricia tenuifolia*, llegando hasta el final de la vertiente (Fig. 2). Al norte de la isla, se presentan cuatro escalones compuestos de menor a mayor profundidad por: algas pétreas, algas sobre escombros, *Agaricia* spp. y corales mixtos y *Agaricia tenuifolia*. Al este, donde se presenta una pendiente suave que alcanza los 22 m de profundidad, el fondo se encuentra tapizado por pastos marinos que rodean parches de coral de dos tipos (*S. sidérea* y *A. tenuifolia*). Finalmente, al sur y sureste de la isla, caracterizada por una dinámica de olas reducida, presenta fondos sedimentarios con pastos marinos y algas (INVEMAR, 2000).

El clima que se presenta en la región es semiseco y cálido, con un comportamiento de precipitación bimodal anual, siendo influenciado por el doble paso de la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical) la cual a su vez controla la dinámica de los vientos Alisios sobre los océanos (Poveda y Mesa, 1999) con

precipitaciones anuales promedio de 1300 mm y una temperatura promedio de 27°C (IGAC, 1975). La temperatura superficial del mar es de 28°C y presenta una salinidad de 36‰, condiciones que permanecen casi constantes (Patiño y Flórez, 1993); aunque es probable que la salinidad se vea afectada durante los periodos lluviosos a causa de la escorrentía fluvial y de aumento en la turbidez de las aguas (Díaz et al., 1996). Las velocidades de las corrientes marinas son de 1 a 3 km/h con dirección NE y la marea que se presenta en toda la costa Caribe Colombiana es semidiurna con amplitud máxima de 50 cm (Javelaud, 1986).

### **3. Materiales y Métodos**

#### *3.1 Muestreo*

En 2005 se recolectó un espécimen del coral *Siderastrea siderea* de Isla Fuerte (Fig. 3) por Maria Mercedes Quiceno (Quiceno, 2008). A este coral se le realizaron múltiples secciones de 5 a 10 mm de espesor. Los detalles de este muestreo se encuentran en el trabajo de grado de Quiceno (2008). Para el desarrollo de este trabajo se tomaron dos lajas de coral, las cuales se limpiaron exhaustivamente en superficie con hipoclorito de sodio con el fin de que las mediciones de susceptibilidad magnética no se vieran afectadas por impurezas adquiridas durante su almacenamiento.

#### *3.2 Fluorescencia*

Para las lajas seleccionadas se tomaron fotografías con luz ultravioleta (UV) en el laboratorio de Fotoluminiscencia de la Universidad EAFIT. Posteriormente a estas fotografías se le aplicaron filtros en el software Inkscape con el fin de obtener una mejor visualización de las bandas fluorescentes. A partir de las bandas de fluorescencia obtenidas en las fotografías, se estableció una cronología aproximada del coral midiendo la separación entre las bandas de crecimiento (Quiceno, 2008).

Las bandas de fluorescencia se han venido estudiando en los últimos años en corales provenientes de diferentes arrecifes; inicialmente Isdale et al. (1998), reportó que las bandas fluorescentes encontradas en corales de la Gran Barrera Coralina se debían a compuestos húmicos y fluviales, los cuales son incorporados al esqueleto coralino, desde las fuentes fluviales a los ambientes costeros como resultado del aumento de la escorrentía terrestre; sin embargo, otros autores encontraron dichas bandas fluorescentes en corales donde las fuentes fluviales no tenían influencia (Theodorou 1995; Tudhope et al. 1996). Por ende las bandas fluorescentes no aparecen estrictamente por la influencia de los ríos al mar, aunque estas se vean desarrolladas en lugares con aportes fluviales considerables.

### *3.3 Medidas Magnéticas*

A un material en presencia de un campo magnético  $\mathbf{H}$  se le induce una magnetización  $\mathbf{M}$ . La magnetización  $\mathbf{M}$  es un efecto macroscópico debido a la contribución microscópica de momentos magnéticos dipolares inducidos y permanentes (Chaparro, 2006). La magnetización  $\mathbf{M}$  es definida por:

$$\mathbf{M} = \kappa \cdot \mathbf{H} \quad (1.1)$$

Siendo  $\kappa$ , la susceptibilidad magnética. Si el campo magnético  $H$  aplicado es lo suficientemente pequeño en magnitud ( $H \sim 80$  A/m) y asumiendo que no hay anisotropía en el medio, es posible establecer, a partir de (1.1), la siguiente relación lineal:

$$k = \frac{M}{H} \quad (1.2)$$

Siendo en este caso,  $\kappa$  una cantidad escalar, susceptibilidad magnética volumétrica, adimensional. Este parámetro es la medida de la facilidad con que un material se magnetiza y depende de los minerales magnéticos presentes, su concentración y características. La medición de  $\kappa$  a campos  $H$  pequeños es una

forma no destructiva de medir las características magnéticas de una muestra (Chaparro, 2006).

Las medidas magnéticas se realizaron en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT. Cada muestra se midió utilizando la técnica magnética de susceptibilidad magnética.

La susceptibilidad magnética ( $k$ ) se midió con un sistema de susceptibilidad MS3 de Bartington Instruments Ltd., conectado a un sensor de registro de núcleo MS2E con un área de respuesta de 3.8 mm x 10.5 mm al final del cilindro cerámico. Las mediciones se realizaron a lo largo de dos lajas de coral (Fig. 4) las cuales median de largo 60 cm y 72 cm cada una, obteniendo así la susceptibilidad magnética cada 5 mm desde la base hasta el techo en el esqueleto coralino.

## **4. Resultados**

### *4.1 Fluorescencia*

A partir de la exposición de las lajas de coral a la luz ultravioleta se obtuvieron dos imágenes que permiten diferenciar de mejor manera la alternancia de bandas de crecimiento del coral. Estas bandas se evidencian mejor bajo la luz ultravioleta debido a que la respuesta de los crecimientos relacionados a épocas de aguas menos salobres presentan más fluorescencia que las bandas relacionadas a épocas de aguas más salobres.

En las imágenes es evidente la alternancia y posible periodicidad entre las bandas oscuras y las bandas fluorescentes en la estructura del coral (Fig. 8 y 9). Según Quiceno (2008) estas bandas fluorescentes corresponden a épocas de inundaciones periódicas del río Sinú, las cuales bajan la salinidad del mar en la zona de Isla Fuerte.

Suponiendo que las inundaciones del río Sinú se dan de manera anual, las bandas de crecimiento se forman anualmente (Quiceno, 2008); de esta manera se estimó la tasa de crecimiento anual para una laja de coral, donde el crecimiento de un año se ve representado por una banda oscura y una banda fluorescente (Fig.5).

Teniendo en cuenta que el coral se extrajo en el 2005, se realizó una cuenta regresiva midiendo una banda oscura con una clara, lo cual representaría un año de crecimiento; midiendo de techo a base se obtuvo un total de 127 años para este espécimen.

De estas mediciones se pudo evidenciar que las bandas oscuras, en promedio, presentan un mayor espesor frente a las bandas brillantes (3.54 y 2.32 mm respectivamente), lo cual indica que es más común el crecimiento del coral durante épocas de aguas salobres y que las épocas de aguas menos salobres son más cortas en tiempo.

#### *4.2 Medición de la Susceptibilidad Magnética*

A partir de las mediciones de susceptibilidad magnética con el sistema MS3 de Bartington Instruments Ltd., se obtuvieron gráficas de longitud vs susceptibilidad magnética para las dos lajas de coral. Para la laja de coral 1 se observan valores muy débiles de susceptibilidad magnética desde la base hasta el centímetro 43 (entre  $-2,97 \times 10^{-2}$  y  $-3,87 \times 10^{-3}$ ); a partir del centímetro 43 hasta el 55 (techo), estos valores aumentan hasta alcanzar valores positivos de  $2,91 \times 10^{-1}$  y  $3,57 \times 10^{-1}$  (Fig. 6).

Teniendo en cuenta que el esqueleto coralino se encuentra constituido por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) cristalizado en forma de aragonita, el cual es un material diamagnético, los valores de susceptibilidad esperados son muy bajos.

Sin embargo, fue posible obtener valores positivos que podrían estar relacionados con la escorrentía del Río Sinú, el cual puede llegar a transportar elementos magnéticos y que son luego incorporados en la estructura del coral a medida que este va creciendo.

Los valores positivos hacia el techo podrían indicar que los corales incluyen materiales magnéticos en su estructura, por lo tanto estas mediciones son un factor importante para encontrar contaminación fluvial en cuerpos marinos, como los corales en este caso particular de estudio. Para próximos estudios es importante incluir estas mediciones para estimar la contaminación de origen continental ya que actualmente no es común encontrar estos análisis en corales o esponjas, cuerpos capaces de incorporar materiales en sus estructuras.

Para la laja de coral coral 2 se obtuvieron tres gráficas, (1) medición 1, (2) medición 2 y (3) medición 3 la cual se realizó por el otro lado de la losa de coral (Fig. 7). Las dos primeras medidas se realizaron en momentos diferentes y generaron una diferencia entre las gráficas por la deriva del equipo, lo cual es algo normal. Para la primera gráfica (Medición 1), se obtuvieron en su mayoría valores positivos con algunos picos negativos a lo largo del coral, y hacia el tope, en el cm 67 los valores son negativos, siendo esto contrario a los resultados obtenidos para el Coral 1. La segunda gráfica (Medición 2), dio como resultado valores netamente negativos; sin embargo, esta gráfica no se tomará en cuenta debido a que estas mediciones estuvieron contaminadas por factores externos, debido al ingreso de gente al laboratorio al momento de realizar la medición.

Finalmente, se realizó una medición al lado contrario de las mediciones 1 y 2 (Medición 3). Los resultados fueron valores únicamente negativos, siendo estos aún más negativos que los obtenidos en la segunda gráfica (Medición 2). Sin embargo, las tres gráficas muestran una tendencia similar hacia el tope del coral

donde se observan valores decreciendo. Dependiendo de donde se tomen las mediciones en las lajas de coral los resultados de SM varían mucho, lo cual es importante tener en cuenta esto para futuros trabajos.

## **Discusión**

En el presente estudio se pretendió determinar la existencia de componentes magnéticos en un ejemplar del coral *Siderastrea siderea*, tomado de Isla Fuerte en el año 2005 (Quiceno, 2008). Este objetivo se alcanzó mediante la realización de perfiles de susceptibilidad magnética (SM) a lo largo de dos lajas del coral.

A partir de las gráficas obtenidas de la medición de las bandas fluorescentes del coral fue posible establecer que el registro que representa este espécimen es de 127 años aproximadamente, contados a partir del año 2005.

Como resultado de la medición de la susceptibilidad magnética (SM) a lo largo de las dos lajas de coral se obtuvieron dos gráficas con mediciones de SM para dos lajas de coral del mismo espécimen. Para la laja de coral #1 se realizaron dos mediciones diferentes, donde en general se observa como los valores negativos se vuelven progresivamente positivos a partir del cm 45 (Fig. 8) hacia el tope de la laja. Al ser el carbonato de calcio un material diamagnético, el obtener valores positivos de susceptibilidad magnética, sugiere que este coral incorporó en su estructura elementos magnéticos los cuales provendrían predominantemente de los sedimentos terrígenos disueltos en el agua de mar que llega a las zonas arrecifales. Sin embargo, debido al diamagnetismo del coral no se descarta que en los valores negativos obtenidos no haya habido un aporte de materiales magnéticos, sino que este aporte fue menor al diamagnetismo del coral, resultando así estos valores negativos.

Por otro lado, para la laja de coral #2 se realizaron tres mediciones, dos de ellas realizadas en días diferentes (condiciones atmosféricas diferentes, las cuales

pueden ligeramente afectar la medición) y una tercera medición por el lado contrario de la laja (Fig. 9). Para las diferentes mediciones se obtuvieron gráficas que en términos generales no son correlacionables con lo encontrado en la laja de coral #1. Para dos de las mediciones, los datos resultaron ligeramente negativos, mientras que para una de las mediciones los datos fueron ligeramente positivos. Sin embargo, todas las mediciones muestran siempre una misma tendencia, caracterizada principalmente por un drástica disminución en los valores de susceptibilidad a partir de los 63 cms, lo cual refleja una menor asimilación de partículas magnéticas hacia las partes más jóvenes del coral. La variación en los valores de susceptibilidad magnética encontrados en esta laja del coral podría explicarse como debida a la baja precisión inherente a la determinación de un valor cercano a cero.

Aunque existe una limitación en cuanto a que no se tiene controlada completamente la dirección en la cual se cortó cada una de las lajas del coral ni la posición de extracción, la laja de coral 2 corresponde a una zona más interna del coral muestreado; mientras que la laja de coral 1 corresponde a una de las zonas laterales externas del espécimen (Fig.10). La ubicación de estas lajas dentro del coral se correlaciona bastante bien con los valores de susceptibilidad magnética obtenidos, pues para la laja de coral 2, se obtuvieron valores notablemente más negativos que para la laja de coral 1, ubicada en la parte más externa del coral. Por lo tanto, cierta parte del coral (lateral) se encontraba más expuesta a las partículas magnéticas, donde fue posible observar valores positivos en las gráficas relacionados al aporte de sedimentos.

Debido a la posición geográfica de Isla Fuerte, el Río Sinú se considera como la principal fuente de aporte de sedimentos al complejo arrecifal, sin descartar que pudiera existir aporte de otras fuentes, entre ellas el río Magdalena. El río Sinú descarga su caudal al mar por medio de tres bocas principales: Corea, Tinajones y

los Llanos, formando así un delta amplio lobulado (Javelaud, 1987). La influencia del río Sinú genera importantes cambios en las condiciones del agua de Isla Fuerte, principalmente aumentando la turbidez y disminuyendo la salinidad (Díaz et al., 1996). De acuerdo con Díaz et al., (1996), en la isla se ha observado mortandad de especies sensibles a la turbidez tales como la *Acropora* spp. y *Agaricia tenuifolia*. Estas mortandades se han asociado por lo tanto a las elevadas tasas de sedimentación que ocurren en las épocas de lluvia, las cuales deterioran las condiciones óptimas de crecimiento y desarrollo de muchas especies de coral. Por lo tanto, es posible afirmar que el Río Sinú si presenta influencia sobre los ecosistemas marinos y probablemente sea uno de los tantos factores externos por los cuales se presenta blanqueamiento en los corales; sin tener en cuenta factores como las precipitaciones en la zona, la nubosidad, las velocidades del oleaje y de vientos, entre otros, los cuales también son determinantes de las consecuencias sobre los arrecifes de Isla Fuerte.

De las fotografías de luz ultravioleta tomadas de las lajas de coral es evidente la alternancia de bandas oscuras y claras (Fig 8 y 9). Teniendo en cuenta que las bandas brillantes se deben a los flujos de agua provenientes de una fuente fluvial (Isdale, 1984) se puede sugerir que estas bandas son formadas en las épocas de mayor caudal del río Sinú, lo que genera la disminución de la salinidad del agua de mar. Para este caso de estudio, las bandas oscuras son en promedio más gruesas que las brillantes (3.54 y 2.32 mm respectivamente), lo que permite inferir que aunque se evidencia influencia del río Sinú en el crecimiento de los corales de Isla Fuerte, esta influencia no es dominante y por el contrario domina la influencia de aguas con alta salinidad durante el crecimiento del coral.

Además, la aparición de estas bandas estaría relacionada con la distancia entre la fuente fluvial y el coral. Según Lough et al., (2002), aquellos corales que se encuentran a distancias de 106 y 176 km de la línea de costa no presentan

luminiscencia, mientras que los que se encuentran entre 0 y 19 km si presentan bandas fluorescentes; entre más cerca se encuentren los corales de las fuentes fluviales las bandas estarán marcadas más fuertemente, a medida que la distancia es mayor son más suaves. Para este caso, la distancia entre el punto de extracción del coral y la desembocadura del río sinú es de 27 km. Es posible observar las bandas claramente, sin embargo, estas no están tan marcadas debido a la distancia en la que se encontraba el coral.

De la medición de la SM en el coral se puede evidenciar una clara relación entre valores altos de SM con bandas brillantes en el coral, mientras que bajos valores de SM se asocian a las bandas oscuras. Por ejemplo para alguna de las bandas brillantes se obtuvo valores de SM de  $-8,41 \times 10^{-2}$ , mientras que para alguna de las bandas oscuras se obtuvo valores de  $-1,14 \times 10^{-1}$ . Estos resultados refuerzan la idea de que en tiempos de un mayor aporte de aguas provenientes del río Sinú, el coral asimiló una mayor proporción de materiales magnéticos, acarreados como sedimentos disueltos desde el continente y aportados al agua de mar en mayor proporción en tiempos de altos caudales (Fig.11). Esta relación permite establecer en qué año el coral recibió el mayor aporte de partículas magnéticas, el cual en este caso se ve reflejado en la laja 1, donde el mayor aporte magnético en términos de SM fue de  $3,57 \times 10^{-1}$  el cual se da en el último año del coral (2005) y el menor aporte es de  $-1,51 \times 10^{-1}$  el cual se evidencia en los primeros años del coral (1879), donde aún no se reportaban causas del deterioro coralino en el caribe colombiano; enfermedades en los corales se comenzaron a reportar desde 1990 (Garzón-Ferreira et al.,2001), y en Colombia, el primer registro de una enfermedad fue publicado por Solano et al., (1993).

Como se mencionó anteriormente, para el coral 2 se obtuvo un cambio súbito hacia valores negativos de susceptibilidad magnética hacia las partes más jóvenes del coral. Esta disminución repentina en la SM es interpretado como una menor

asimilación de partículas magnéticas por parte del coral debido a una menor disponibilidad de material magnético en el agua de mar. Este cambio súbito en la disponibilidad de material magnético en el agua de mar podría estar asociado posiblemente a la construcción de la represa Urrá-1 sobre el río Sinú. Esta presa inició su funcionamiento en el año 1999, modificando las condiciones del régimen del caudal y la cantidad de sedimentos aportados al mar. Sin embargo, aunque esta hidroeléctrica haya comenzado su funcionamiento en 1999, se evidencia en la laja 1, un mayor aporte de sedimentos terrígenos debido a una posible deforestación para la construcción de la presa en las partes altas del río, generando un mayor transporte de estos en un menor volumen de agua. Adicional a esto, en la fotografía de luz ultravioleta, se observa un cambio de densidad de las bandas, apreciándose un menor contraste de las bandas luminiscentes hacia el tope del coral (Fig.12), esta disminución en el contraste podría estar relacionada con el menor volumen de agua transportada a partir de la construcción de la hidroeléctrica, pero existiendo un mayor aporte de sedimentos.

Incluir estas mediciones de susceptibilidad magnética son de suma importancia en futuros estudios de contaminación ambiental, ya que por medio de este estudio se comprobó que los corales funcionan como señales ambientales debido a su capacidad de incorporar partículas magnéticas en su estructura, sin embargo, se recomienda conocer la orientación del coral al momento de ser extraído, debido a que con esto se pueden obtener resultados e interpretaciones más acertadas acerca de la variabilidad de los resultados.

## **Conclusiones**

- Como se pudo observar en las imágenes obtenidas de la exposición de las lajas de coral *Siderastrea siderea* a luz ultravioleta, hay presencia de bandas luminiscentes, lo cual hace que esto sea un determinante para confirmar la influencia de fuentes fluviales en el complejo arrecifal de Isla

Fuerte; ya que estas bandas se forman principalmente por compuestos húmicos provenientes del continente y se incorporan en el esqueleto coralino.

- Se puede concluir que debido a que el Río Sinú es la fuente fluvial más cercana al complejo arrecifal, por lo tanto, se propone que esta sería la principal fuente de aporte de minerales magnéticos de origen continental incorporadas al océano y por lo tanto asimiladas por los corales cercanos a la costa. El río Sinú es el segundo afluente fluvial que más sedimentos aporta al mar Caribe. Sin embargo, no es de descartar que el río Magdalena tenga cierto aporte de sedimentos terrígenos a este complejo.
- Con las bandas fluorescentes encontradas fue posible establecer una cronología anual del coral, obteniendo una edad aproximada de 127 años. Por lo tanto tendríamos registro desde el año 1879 hasta el 2005.
- Fue posible obtener valores positivos de susceptibilidad magnética para la laja de Coral 1. Estos valores obtenidos desde el cm 43 hasta el techo del coral, teniendo valores máximos de  $2,91 \times 10^{-1}$  y  $3,57 \times 10^{-1}$ . Se concluye que efectivamente el coral es capaz de incorporar elementos magnéticos (en este caso minerales terrígenos) en su estructura.
- Dados los resultados positivos hacia las partes más externas de la laja de Coral 1, se puede inferir un aumento en la asimilación de partículas magnéticas en los años más recientes. Lo cual es interpretado como un aumento del aporte de sedimentos terrígenos desde el continente y asimilados por el coral.
- Para la laja de Coral 2 no se obtuvieron valores positivos hacia el techo del coral. Al contrario, estos valores fueron disminuyendo hasta obtener valores

mínimos de  $-9 \times 10^{-2}$  y  $-4,13 \times 10^{-2}$ . Esto indica que el aporte de elementos magnéticos fue menor al aporte diamagnético del carbonato de calcio.

- Existe una relación entre las bandas fluorescentes y los valores de susceptibilidad magnética, donde ciertos valores altos de SM coinciden con las bandas brillantes, lo que estaría indicando que existe un aporte fluvial con elementos magnéticos considerable.
- Se pudo observar una disminución en el contraste de las bandas fluorescentes hacia el tope de coral en la fotografía de la luz ultravioleta, esto debido posiblemente a la construcción de la hidroeléctrica URRÁ-1, la cual disminuiría el flujo de agua y la carga de sedimentos que desemboca en el mar caribe y la cantidad de sedimentos.
- Es importante para futuros estudios tomar los datos de la orientación del coral para poder establecer de qué lado el espécimen está más expuesto a las partículas en suspensión provenientes del flujo de los ríos.
- Las mediciones de susceptibilidad magnética son una herramienta de bajo costo, la cual se puede emplear en los corales para estudios de contaminación ambiental, ya que actualmente no se cuenta con ningún estudio de este tipo.
- Como los corales son organismos que se alimentan mediante la filtración del agua de mar, finalmente, serían un análogo a las plantas epífitas, las cuales pueden incorporar elementos magnéticos en sus estructuras producto de la filtración. Siendo así entonces los corales un organismo que tiene alto potencial para su uso en magnetismo ambiental al igual que lo son las plantas epífitas, musgos y líquenes.

- El instrumento empleado para este estudio (sensor de registro de núcleo MS2E) tiene un grado de sensibilidad muy alto, lo cual hace que las mediciones varíen notablemente dependiendo del lado del coral en que se mida la susceptibilidad magnética y de las condiciones atmosféricas del día.
- Las mediciones positivas de SM y las bandas fluorescentes en el coral indican aporte importante de sedimentos al complejo arrecifal. Los sedimentos en suspensión son la mayor causa de estrés y deterioro coralino, aunque existan factores naturales como los cambios bruscos en la temperatura, el calentamiento atmosférico, el fenómeno del niño, la construcción de presas aguas arriba, entre otros, los cuales también contribuyen en este proceso.
- Las mediciones de SM en lajas o cortes de coral, son de gran importancia para complementar los estudios sobre impactos de fuentes fluviales en los ecosistemas coralinos.

## Referencias

- Anderson, P.S. 1971. Isla Fuerte. *Colombia Geográfica* 5 (2): 119-191
- Chaparro, M. A. E. 2006. Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártida. *Geofísica UNAM*, pág. 13-28.
- Da Silva, A. C., & Boulvain, F. 2002. Sedimentology, magnetic susceptibility and isotopes of a Middle Frasnian carbonate platform: Tailfer section, Belgium. *Facies*, 46(1), 89-101.
- Díaz, J. M., Sánchez, J. A. Y Díaz-Pulido, G. 1996. Geomorfología y formaciones arrecifales recientes de Isla Fuerte y Bajo Bushnell, plataforma continental del Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 25: 87-105.
- Díaz, J.M., Díaz-Pulido, G., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., Sánchez, J.A., Zea, S., 1996. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. Complejos arrecifales oceánicos. Serie de Publicaciones especiales vol. 2. INVEMAR, Santa Marta.
- Duque-Caro, H. 1980. Geotécnica y evolución tectónica de la región noroccidental colombiana. *Bol. Geol., Ingeominas*, 23(3): 4-37.
- Duque-Caro, H. 1984. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. En: *Boletín geológico del INGEOMINAS*. Vol. 27. N° 2. Bogotá. 29p.
- Garzón-Ferreira, J., Gil-Agudelo, D., Barrios, L., Zea, S. 2001. Stony coral disease observed in southwestern Caribbean reefs. *Hidrobiología* 460, 65–69.
- IGAC. 1975. Estudio hidroclimático de la región del Caribe. Instituto Geográfico 'Agustín Codazzi'. Bogotá. 77 p.
- INVEMAR, 2000. Áreas coralinas de Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis". Serie Publicaciones Especiales, No. 5. Santa Marta.
- Isdale, P.J., Stewart, B.J., Tickle, K.S., Lough, J.M. 1998. Palaeohydrological variation in a tropical river catchment: a reconstruction using fluorescent bands in corals of the Great Barrier Reef, Australia, *The Holocene*, 8, 1- 8,.
- Javelaud, O. 1986. Sedimentología de la plataforma continental del Caribe Colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 6: 17-39.

Lough, J., Barnes, D., & McAllister, F. 2002. Luminescent lines in corals from the Great Barrier Reef provide spatial and temporal records of reefs affected by land runoff. *Coral reefs*, 21(4), 333-343.

Mc. Laughlin, C.J., Smith, C.A., Buddemeier, R.W., Bartley, J.D., Maxwell, B.A. 2003. Rivers, runoff, and reefs. *Global and Planetary Change* 39, 191–199.

Patiño, F y Flores, F. 1993. Estudio ecológico del Golfo de Morrosquillo. Universidad Nacional de Colombia- Fondo 'FEN' Colombia, Santa Fé de Bogotá. 109 p.

Poveda, G. & O. Mesa. 1999. La corriente de chorro superficial del oeste (“del Chocó”) y otras 2 corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(89): 517–528.

Quiceno, M.M. 2008. Patrones de variabilidad climática y oceánica en la zona costera del Río Sinú y su señal en registros naturales lacustres y coralinos. Tesis de Grado. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Restrepo, J. D., Zapata, P., Díaz, J. M., Garzón-Ferreira, J., & García, C. B. 2006. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50(1-2), 33-49.

Solano, O. D., G. R. Navas & S. K. Moreno-Forero, 1993. Blanqueamiento coralino de 1990 en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario (Caribe colombiano). *An. Inst. Invest. mar. Punta Betín* 22: 97-111.

Theodorou, N. 1995. Enigmatic properties of fluorescent banding in massive corals of the species *Porites lutea* from Phuket, Thailand.

Tudhope A.W., D.W. Lea, G.B. Shimmield, C.P. Chilcott & S. Head. 1996. Monsoon climate and Arabian sea coastal upwelling recorded in massive corals from southern Oman. *Palaios*, 11: 347-361.

Vernette, G. 1989. Examples of diapiric control on shelf topography and sedimentation patterns on the Colombian Caribbean continental shelf. *Journal of South American Earth Sciences* 4(2):391-400.

## **Lista de Figuras**

**Fig.1** Localización general de Isla Fuerte.

**Fig.2** Mapa de unidades ecológicas de los fondos marinos alrededor de Isla Fuerte. Tomado de INVEMAR, 2000.

**Fig.3** Mapa de localización de extracción del coral *Siderastrea Sidera* de Isla Fuerte, tomado por Maria Mercedes Quiceno (Quiceno, 2008).

**Fig.4** Lajas de coral sobre las cuales se realizaron las mediciones de susceptibilidad magnética. (a) Coral 1 y (b) Coral 2.

**Fig.5** Gráfica anual de crecimiento (mm).

**Fig.6** Gráficas de susceptibilidad magnética (SI) obtenidas para el Coral 1.

**Fig.7** Gráficas de susceptibilidad magnética (SI) obtenidas para el Coral 2.

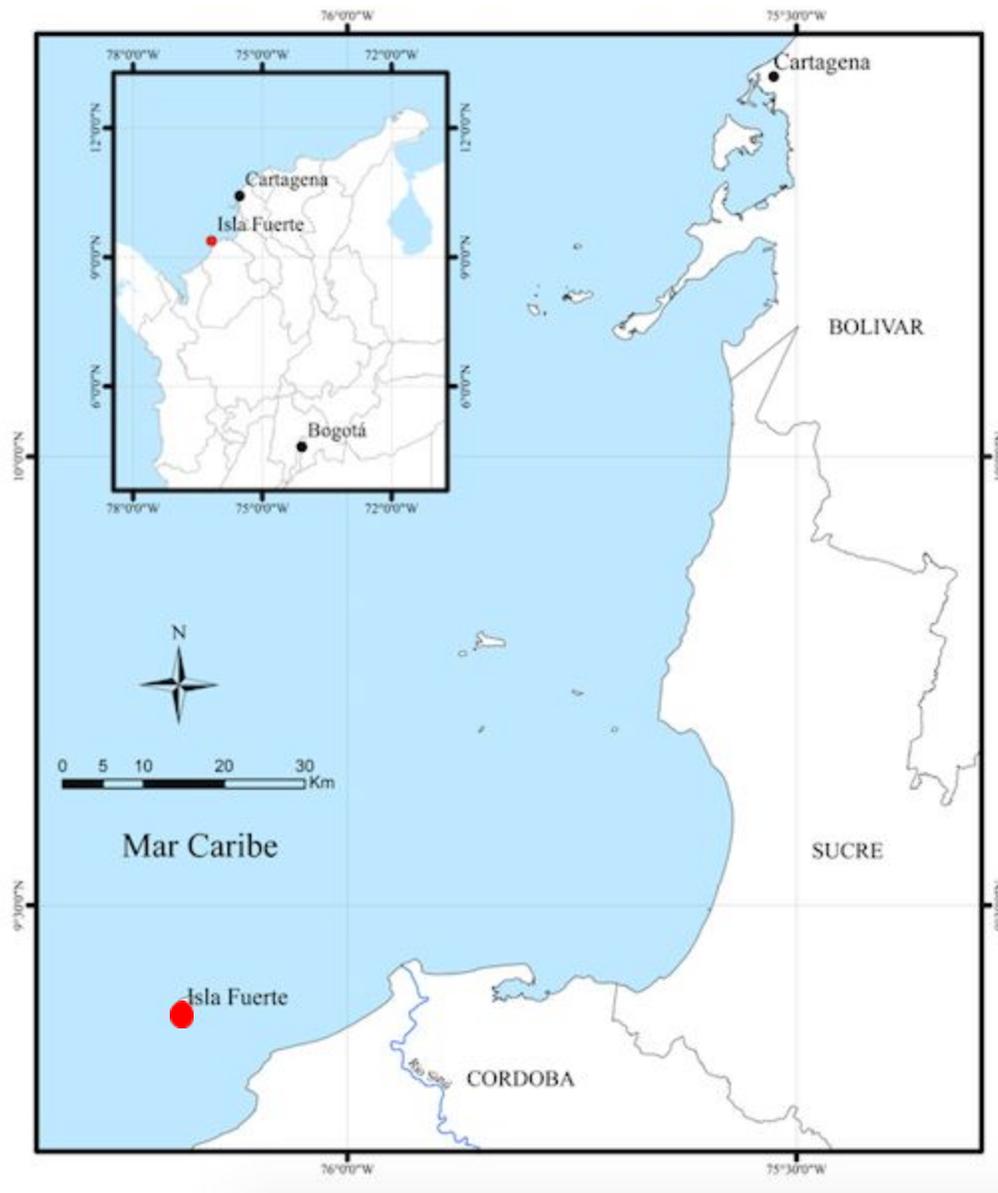
**Fig.8** Gráficas de susceptibilidad magnética del Coral 1, superpuestas a la fotografía de luz ultravioleta con filtros aplicados donde se pueden apreciar las bandas de crecimiento.

**Fig.9** Gráficas de susceptibilidad magnética del Coral 2, superpuestas a la fotografía de luz ultravioleta con filtros aplicados donde se pueden apreciar las bandas de crecimiento.

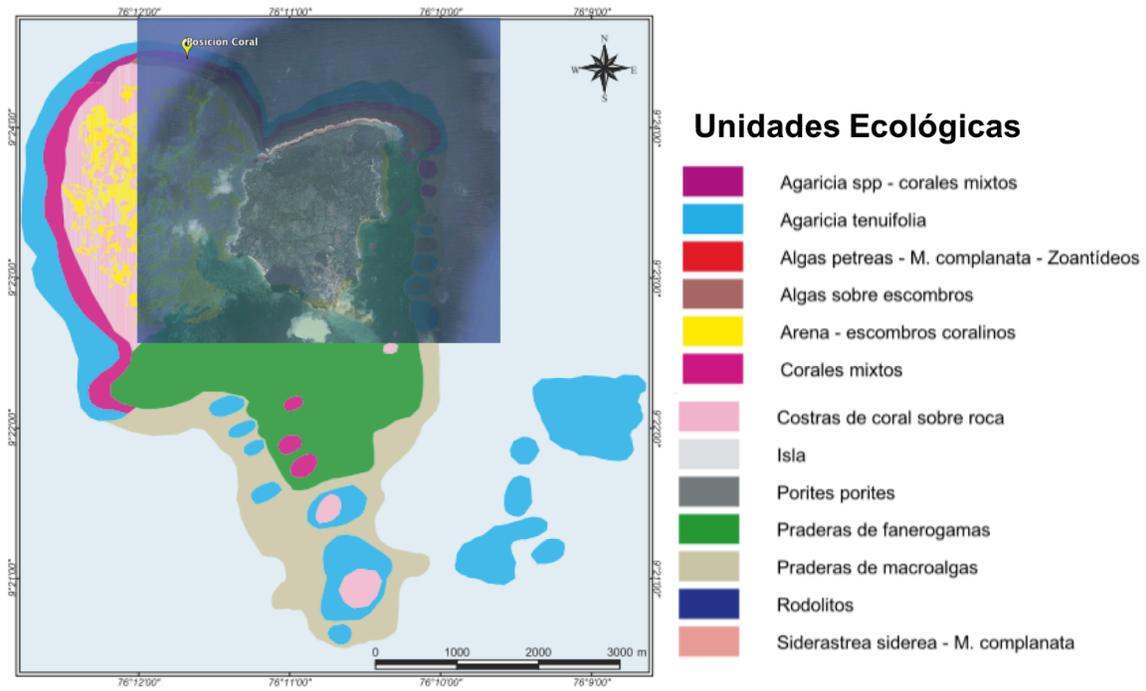
**Fig.10** Ubicación de las lajas en el cuerpo del coral. Tomada por Maria Mercedes Quiceno (Quiceno, 2008).

**Fig.11** Ejemplos de valores de susceptibilidad magnética con respecto a las bandas de crecimiento.

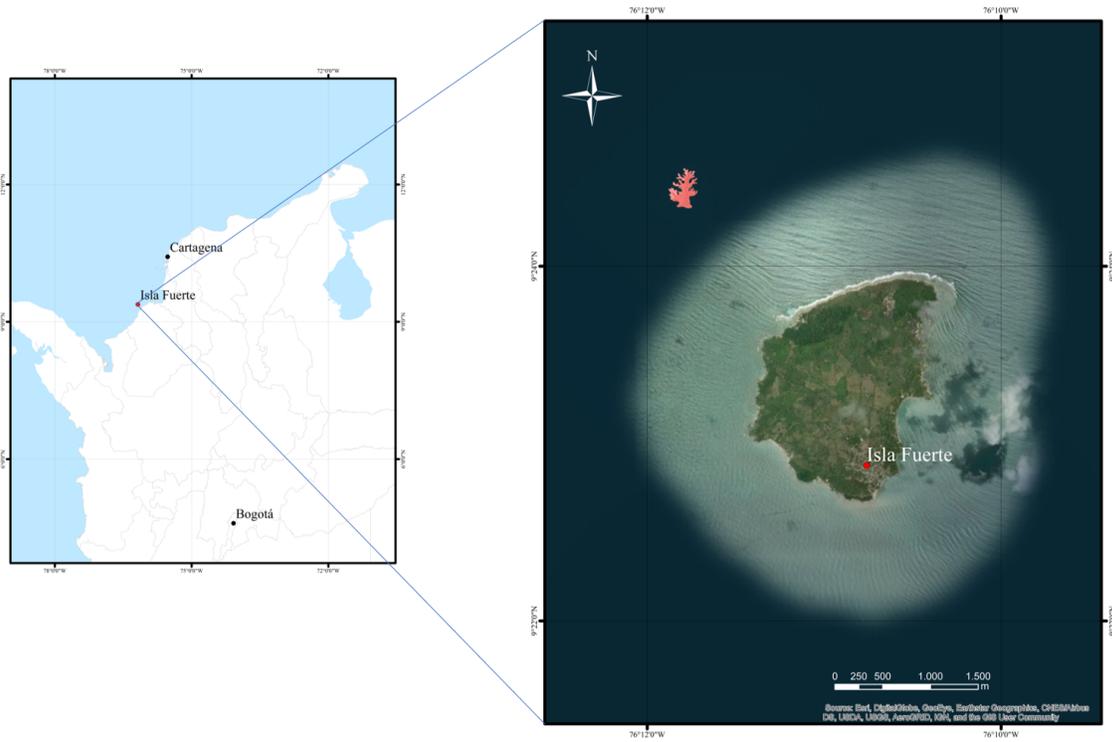
**Fig.12** Cambio de contraste en las bandas fluorescentes.



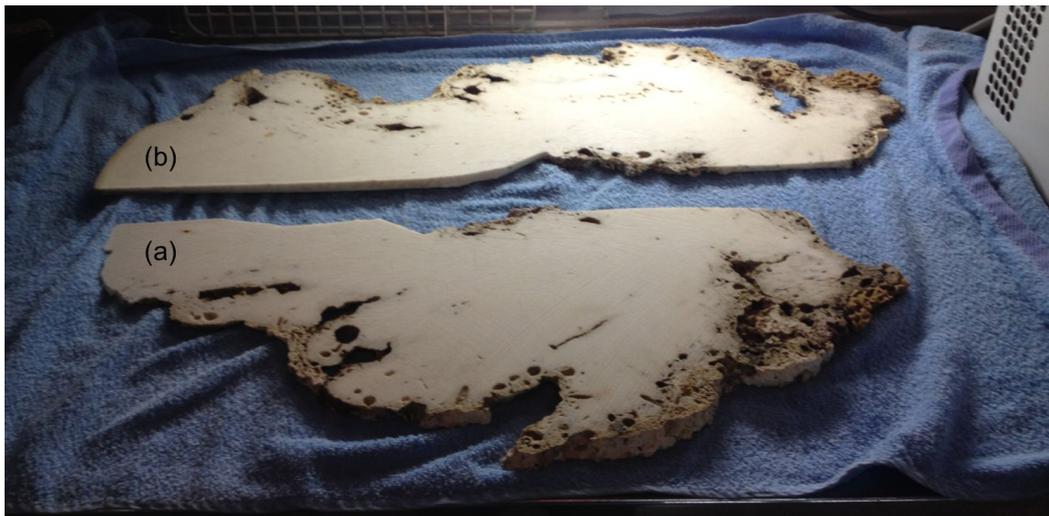
*Figura 1. Localización general de Isla Fuerte.*



**Figura 2.** Mapa de unidades ecológicas de los fondos marinos alrededor de Isla Fuerte. Tomado de INVEMAR, 2000.



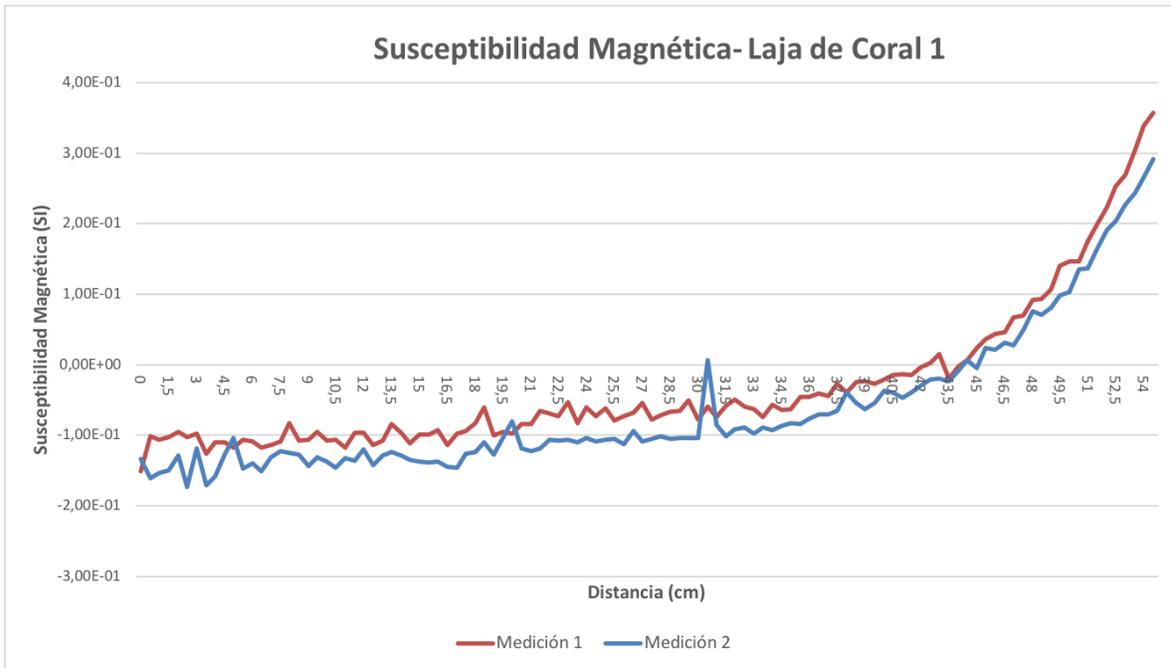
*Figura 3. Mapa de localización de extracción del coral *Siderastrea siderea* de Isla Fuerte, tomado por Maria Mercedes Quiceno (Quiceno,2008).*



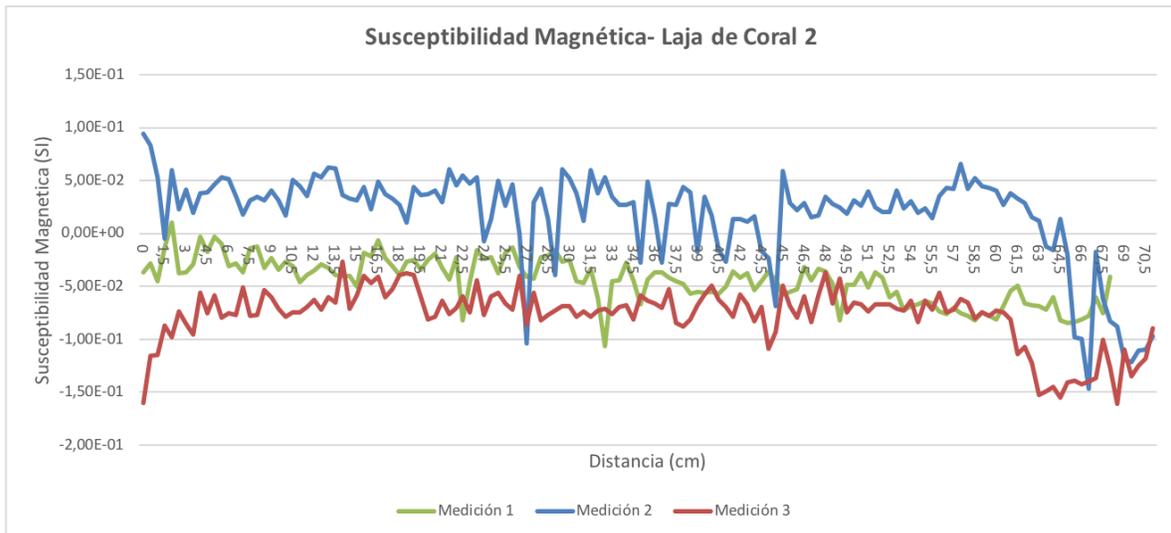
*Figura 4. Lajas de coral sobre las cuales se realizaron las mediciones de susceptibilidad magnética. (a) Coral 1 y (b) Coral 2.*



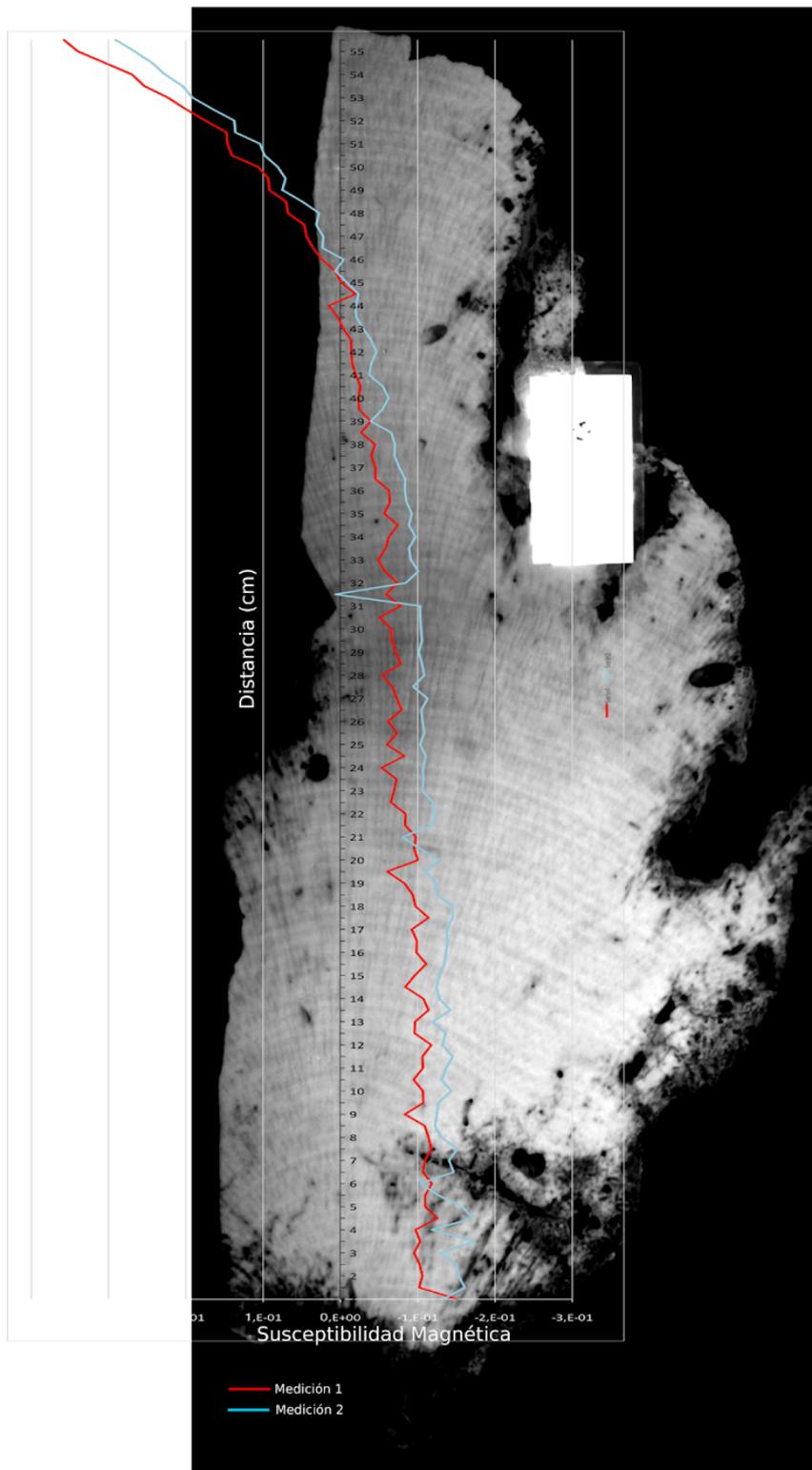
**Figura 5.** Gráfica anual de crecimiento (mm).



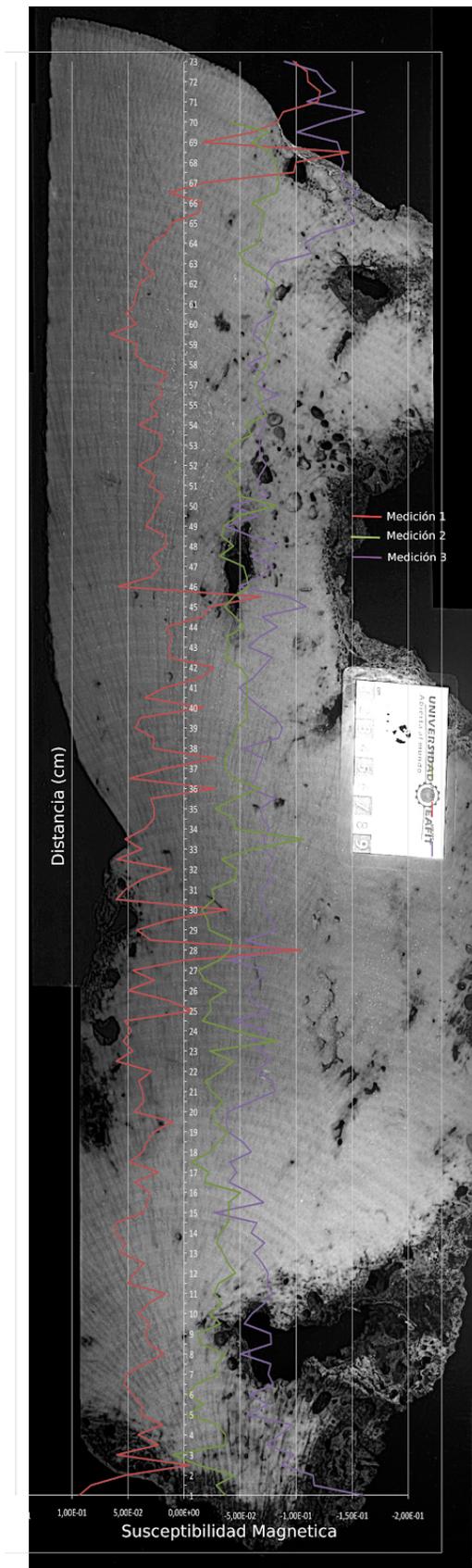
**Figura 6.** Gráficas de susceptibilidad magnética (SI) obtenidas para el Coral 1 .



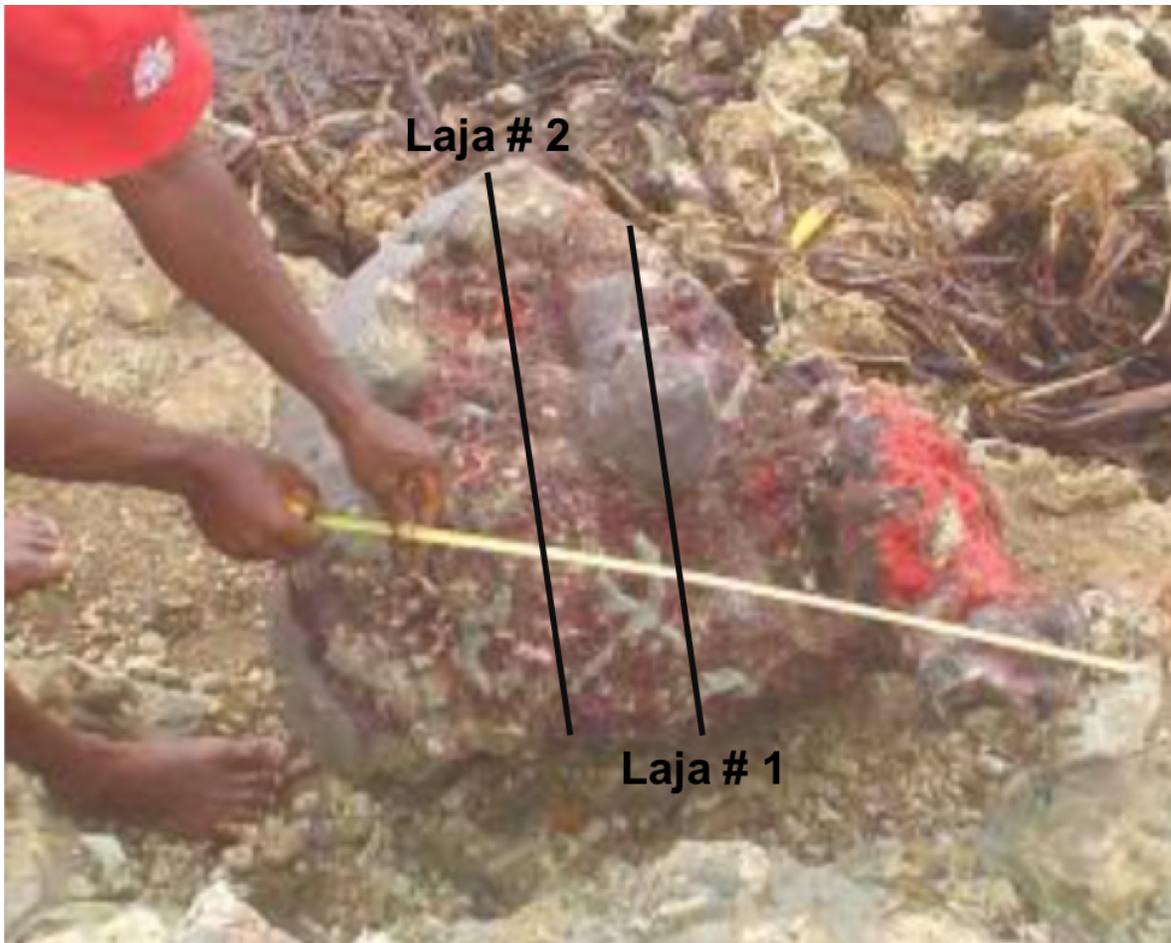
**Figura 7.** Gráficas de susceptibilidad magnética (SI) obtenidas para el Coral 2 .



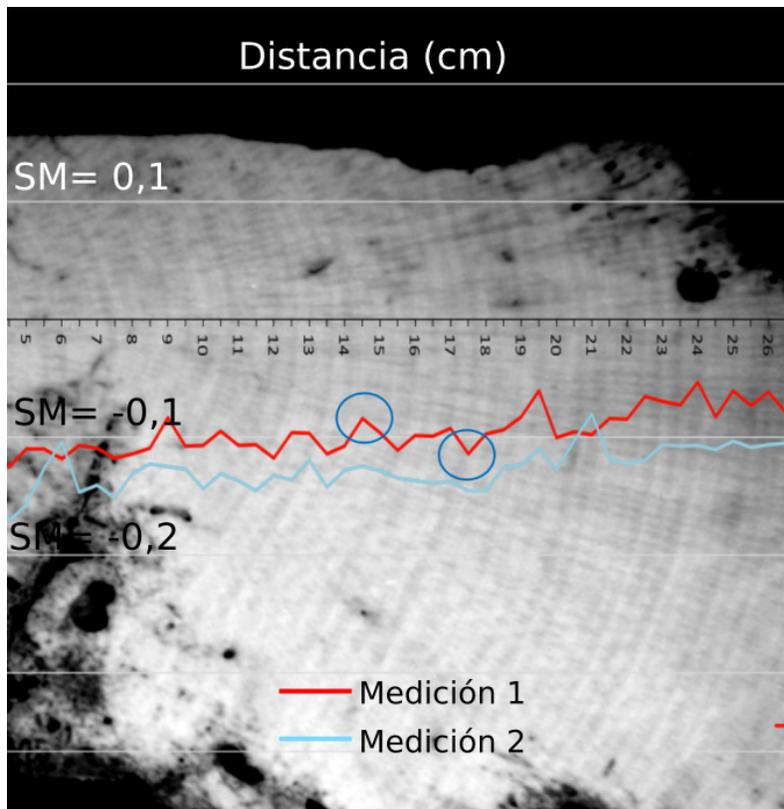
*Figura 8. Gráficas de susceptibilidad magnética del Coral 1, superpuestas a la fotografía de luz ultravioleta con filtros aplicados..*



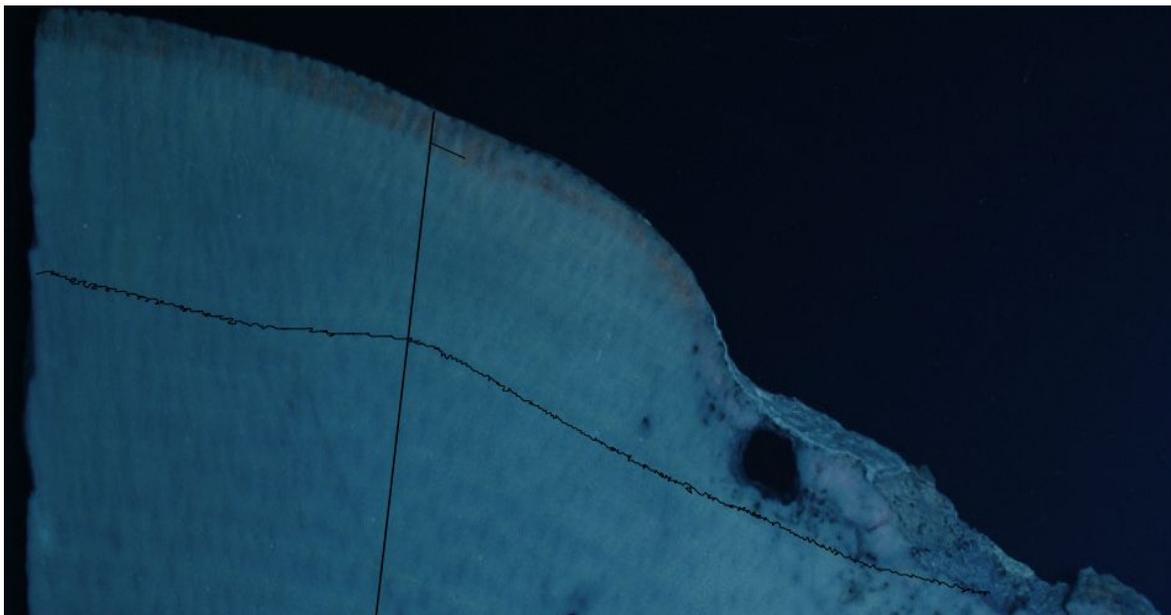
*Figura 9. Gráficas de susceptibilidad magnética del Coral 2, superpuestas a la fotografía de luz ultravioleta con filtros aplicados..*



*Figura 10. Ubicación de las lajas en el cuerpo del coral. Tomado por Maria Mercedes Quiceno (Quiceno, 2008).*



*Figura 11. Ejemplos de valores de susceptibilidad magnética con respecto a las bandas de crecimiento.*



*Figura 12. Cambio de contraste de las bandas fluorescentes.*