



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS DE ANOMALÍAS DE TEMPERATURA POR
MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN PUNTA
MITA, NAYARIT, MÉXICO

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO
P R E S E N T A:

MANUEL ALEJANDRO VÁZQUEZ DEL MORAL

TUTOR DR. MARCO ANTONIO TORRES VERA

MÉXICO, D.F. 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, disculpen, porque decidí escribir esto como saliera, creo que es la mejor manera, como uno lo va sintiendo, entonces tendrá uno que otro error.

Quería tener grandes ideas para enaltecer a todas esas personas que han sido pilar importante para el logro de este objetivo, pero las palabras se me quedan cortas para agradecerles y para poderles hacer sentir el gran amor y admiración que les tengo.

Quiero dedicar este logro a un gran amigo, el mejor amigo que pueda existir, mi hermano, que ha sido complice, confidente, consejero y hombro para apoyarme en esos momentos en los que he necesitado consuelo y también cuando no lo he necesitado, gracias por estar siempre ahí.

También tengo que darle su lugar y las gracias a mi padre y a mi madre, como las herramientas que forjaron el hombre que soy, sin ustedes no sería quien soy.

A mi novia, Lisset, por ayudarme y apoyarme, por desvelarse pasando algunos apuntes o por investigar algo que necesitaba. Te amo.

A mis abuelos, que me dieron el carácter y consejos sabios para llegar a donde estoy. A mi abuela Josefina por cuidarme y educarme mientras mi madre y padre trabajaban duro para sacarnos adelante; por las buenas nalgadas, pero también por educar con caricias y consentimientos que me mostraron que hay muchas formas de hacer ver las cosas que están mal.

A mis primos y tíos. A Javier, Pedro, Iliana, Yutzil, Marycarmen y Paulina, por creer en mi y por echarme porras. A mi tío José Cruz por quererme tanto y por enseñarme a no ser un inútil; a mi tía Martha y mi tío José Luis por demostrarme siempre su cariño; a la tía Estela, que siempre me tronó el 'chicotito' para que acabara una carrera y no desperdiciara mi talento.

A mis amigos por demostrarme admiración y lealtad, y enseñarme cosas que nunca olvidaré. A Yeyo, gracias por estar siempre que te he necesitado COMPADRE; de la primaria 'al Rajas' por enseñarme el valor de la sinceridad; de la fac a Carlos (Don), Raúl, Beto, Abigail, Miguel e Iván.

A mis sinodales. En especial a mi tutor, el Dr. Torres, y a la Dra. Prol, que reconozco, me apoyaron al 110% dándome un rato de su tiempo para que esto saliera lo más rápido posible. A Eduardo Amador por su amistad y por su disposición para ayudarme siempre que lo necesité.

Y todos los que se me han atravesado en mi vida.

A TODOS USTEDES tengo que agradecerles por hacerme quien soy, porque cada uno ha puesto un granito en este castillo de arena; todos!, con sus consejos, por su apoyo, por enseñarme de manera directa o indirecta, por aguantarme y por compartir su vida conmigo.

Gracias. Como se disfruta una vida cuando la vida se comparte con personas como ustedes.

Índice

INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	4
Zona de Estudio: Punta Mita	4
Geología Local	6
Ventilas Hidrotermales	7
Percepción Remota	8
SST (Sea Surface Temperature – Temperatura de la Superficie del Mar)	9
Series de Tiempo y Conceptos de Análisis Estadístico	13
METODOLOGÍA	14
AVHRR y MODIS	16
Landsat TM	16
AVHRR (modificado)	18
RESULTADOS	20
AVHRR y MODIS	20
Landsat TM	21
AVHRR (modificada)	22
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	31

INTRODUCCIÓN

Punta Mita forma parte de la Bahía de Banderas que está localizada en la costa suroeste del estado de Nayarit, México. Mar adentro, aproximadamente a 500 m de la costa, se localizaron mediante la exploración en campo manifestaciones de ventilas hidrotermales a una profundidad de 10 m por debajo de la superficie del mar (Prol-Ledesma *et al.*, 2000). Las manifestaciones hidrotermales de la zona se extienden a lo largo de 400 m sobre la llamada “Fisura de Las Coronas”, descrita por Prol-Ledesma *et al.* (2000).

La localización de las ventilas hidrotermales generalmente se realiza por medio de exploraciones en campo, lo que en ocasiones puede no ser accesible. El presente trabajo plantea una metodología para realizar dicha exploración a través de las herramientas que brindan las imágenes de satélite para la localización de las ventilas en superficie del mar sin tener que hacer exploración de grandes áreas en campo, utilizando los cálculos de temperaturas (temperatura de brillantez) de las distintas imágenes.

Las temperaturas de brillantez pueden obtenerse a partir de datos de distintos sensores: AVHRR, MODIS, Landsat, etcétera. La dispersión del calor a través del cuerpo de agua causada por las corrientes submarinas y las pequeñas corrientes provocadas en alguno de los casos por el viento que roza la superficie marina, así como también la disipación propia de las manifestaciones de calor relacionada a la tendencia, propia de los cuerpos en contacto, a buscar su equilibrio térmico, dan como resultado que el área de manifestación pueda verse afectada en el tamaño, esto claro, sabiendo que la fuente es una ventila de un par de metros, como se presentó en este caso. De lo anterior se pudo definir que la resolución espacial del sensor fue otro factor importante que se tomó en cuenta para tomar la decisión de ocupar o no cierto sensor.

El tomar una serie de tiempo con mayor resolución temporal, implicó tener una observación estacional con mayor resolución, y entonces, encontrar anomalías térmicas con la ayuda de los contrastes de temperatura del mar debidos a los cambios estacionales, e incluso, diurnos. Por lo que fue necesario considerar la resolución temporal del sensor.

La temperatura de brillantez es la temperatura que se asocia a la radiación de cuerpo negro con base en la energía emitida en una cierta longitud de onda. Este método sirve de base para el estudio de las temperaturas a distancias remotas. Con el fin de detectar anomalías de temperatura se buscará, en el presente trabajo, la viabilidad de utilizar el ancho de bandas (longitudes de onda) en que las temperaturas son detectadas.

El objetivo de este trabajo es determinar las temperaturas de brillantez con imágenes multiespectrales y aplicar diferentes métodos para encontrar la correlación de las anomalías termales en las imágenes con la localización de las ventilas: análisis de series de tiempo, diferencias de temperatura en series de tiempo, comparación de temperaturas en imágenes raster y comparación de datos estadísticos entre las series de tiempo de temperaturas de cada uno de los distintos píxeles entre si.

ANTECEDENTES

Zona de Estudio: Punta Mita

Punta Mita es una provincia del estado de Nayarit y forma parte del límite noroeste de la Bahía de Banderas. Esta bahía está solamente conformada por el límite de costa de dos estados de la República Mexicana: Nayarit y Jalisco (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio.

La batimetría es un factor importante para la manifestación en superficie del mar de las altas temperaturas que producen las ventilas hidrotermales porque debido a su poca profundidad con respecto a la superficie del mar las corrientes cálidas que generan las ventilas pueden mostrar un contraste relativamente más fuerte que si se encontraran a profundidades más altas. Diferentes estudios batimétricos describen la superficie submarina de la zona. Una planicie continental (Figura 2) se extiende hacia el centro de la bahía (el sur) y el Océano Pacífico (hacia el oeste) aproximadamente a 10 Km de la costa (Álvarez, 2007). Debido a que la pendiente de la planicie sea muy baja los puntos dentro de la misma, los puntos en el suelo marino al alejarse de la costa, prácticamente, se encuentran a profundidades someras.

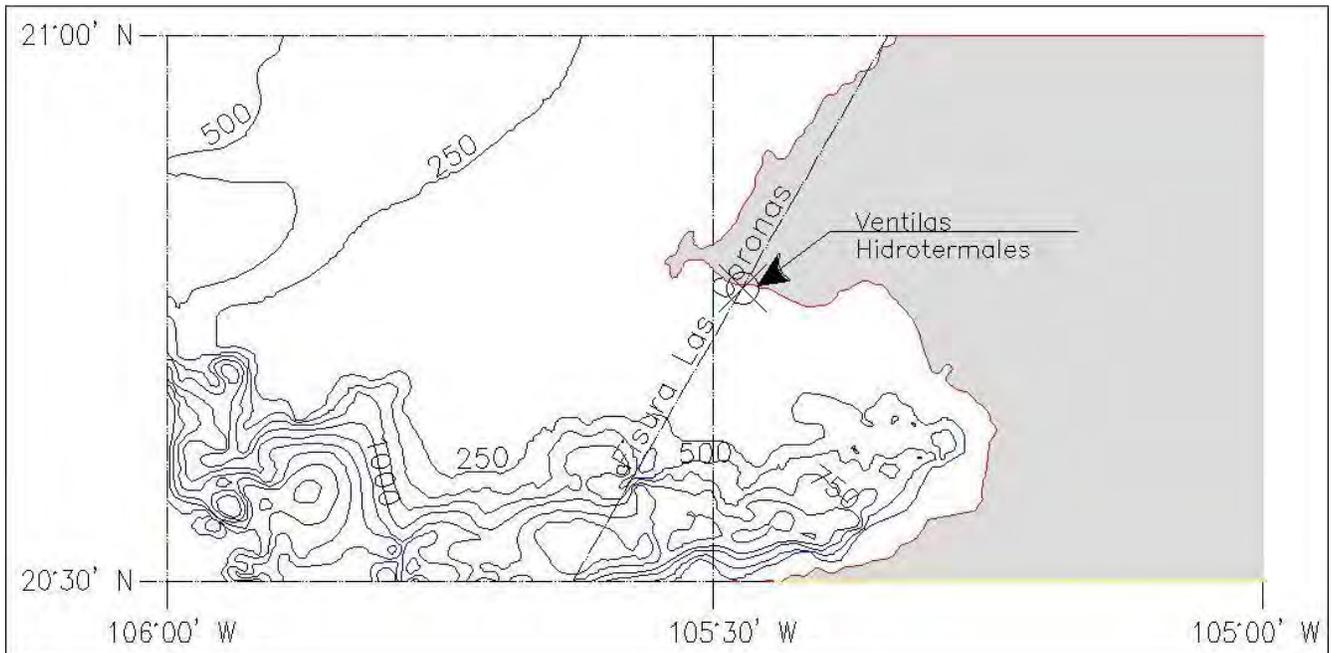


Figura 2. Curvas de nivel por debajo del nivel del mar, todas las cotas son negativas, el área gris es el continente. Se puede observar la traza de la 'Fisura Las Coronas' (línea punteada) y la localización de las ventilas hidrotermales.

La circulación del agua de mar dentro de la bahía es un fenómeno que debe ser tomado en cuenta para la posible aparición de las manifestaciones hidrotermales en las imágenes para poder estimar

una buena o mala estimación de la ubicación de una anomalía térmica. La circulación de las corrientes es generalmente en dirección noroeste con la salida del agua por la zona sur de la bahía (Sánchez-González 2000).

Geología Local

Las rocas que afloran en la zona varían desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Explicándolo de una forma ascendente en el tiempo geológico se esquematizará de forma breve las distintas intercalaciones de material rocoso en la zona (Prol-Ledesma *et al.* 2003).

La zona de Punta Mita está sobre un basamento de materiales metamorfizados que consisten en su mayoría de gneises y esquistos calcáreos del Paleozoico. Las formaciones anteriores son seguidas por depósitos del Cretácico identificadas como conglomerados y calizas en su base e intercalaciones de limolitas y areniscas encima. La base del Cretácico se ve afectada por la intrusión de la granodiorita que pudo haber afectado y recristalizado las unidades con las que tuvo contacto, como la caliza (Prol-Ledesma *et al.* 2003).

En el Terciario se encuentran predominantemente rocas volcano-sedimentarias. Flujos de lava, pillow lavas, flujos piroclásticos y diques son parte de lo que, de manera general se encuentra en la secuencia correspondiente a este periodo. La secuencia del Terciario comienza con ignimbritas que son cubiertas por una intercalación de flujos de lava basáltica, nuevamente ignimbritas y una unidad de conglomerado formado por fragmentos de varias unidades subyacentes como granodiorita, granito, gneiss, ignimbrita y basalto. Esta unidad es difícil de localizar estratigráficamente debido a la alteración provocada por la alta actividad tectónica del lugar (Prol-Ledesma *et al.* 2003).

Finalmente, la depositación del Cuaternario corresponde a brecha basáltica y flujos de escoria con

intercalaciones de depósitos terrígenos que sugieren un volcanismo del tipo fisural (Prol-Ledesma *et al.* 2003). La roca basáltica es muy vesicular, algunos de los espacios están rellenos por celadonita que es un material producto de la alteración, también contienen zeolitas y ocasionalmente carbonatos.

En la zona de estudio se tienen distintos elementos tectónicos, esta área es el límite norte de la Trincheras de Centroamérica, zona de subducción consecuencia del choque de la placa de Cocos y la placa de Norteamérica. Por otro lado se tiene que la Bahía de Banderas es afectada por el movimiento de la placa de Rivera.

La zona está sometida a esfuerzos de compresión en dos direcciones y uno de distensión, por lo que las manifestaciones de dichos esfuerzos son reflejadas en fracturamiento de las unidades rocosas. El esfuerzo de distensión es una manifestación de la apertura del Mar de Cortés.

La tectónica del lugar predominantemente está caracterizada por el Bloque Jalisco, una porción de corteza terrestre que está limitada al noreste por el Graben Tepic-Zacoalco, al sureste por el Graben Colima y hacia el suroeste por la trincheras de la placa de Rivera.

El Bloque Jalisco está limitado por secciones de corteza fisurada formando fracturas y fallas en cada uno de los límites. El presente estudio se enfoca principalmente en solamente una fisura nombrada como „Fisura Las Coronas’ con una orientación de N25E (Prol-Ledesma *et al.* 2003).

Ventilas Hidrotermales

Las ventilas hidrotermales son sistemas de circulación de agua caliente provocada, generalmente,

por el calor aportado por algún cuerpo caliente cercano al volumen de líquido almacenado en el interior del subsuelo. Los sistemas hidrotermales se presentan en lugares con rocas fracturadas o con porosidad interconectada en donde el agua puede transportarse hasta llegar a una fuente de calor (roca fundida o gradiente geotérmico), donde el agua al estar tan cerca de una fuente de alta temperatura es calentada, llegando a alcanzar hasta 400°C, hasta que por convección se descarga en el fondo marino o en la superficie de la tierra.

Percepción Remota

La percepción remota es conocida, generalmente, como el estudio de los objetos por medio de imágenes a distancia de dicho objeto.

El principio básico mediante el que funcionan dichos sistemas es el de la radiación de ondas electromagnéticas a través del espacio, que son la manifestación de energía presente en los cuerpos. Principalmente, en el caso de la Tierra, esta energía es aportada por el Sol, sin embargo también pueden existir distintas fuentes. Las frecuencias y las longitudes de onda en las que se manifiestan las ondas electromagnéticas en la naturaleza es conocida como el espectro electromagnético (Figura 3) y está dividido en varios segmentos, donde se pueden identificar ondas características como las de radio, televisión o, en otro extremo, los rayos gamma o rayos ultravioleta. Con base en sus parámetros físicos las ondas, ya sea frecuencia o longitud de onda, pueden presentar una mayor energía hacia las frecuencias altas y longitudes de onda cortas, y energía baja en las frecuencias bajas y longitudes de onda larga. Apoyados en lo anterior se puede entonces comprender que las temperaturas altas se manifestarán mejor en longitudes de onda más cortas que las temperaturas más bajas, y de forma similar con la frecuencia.

La banda más importante para este proyecto es el infrarrojo debido a que en esta región del espectro

electromagnético se manifiesta la energía que tienen, prácticamente, todos los cuerpos del planeta Tierra; este sector de ondas se divide a su vez en tres secciones principales: Infrarrojo Cercano, el más próximo al visible y que llega hasta 1.1 μm ; Infrarrojo Medio a los 15 μm , y el Infrarrojo Térmico hasta los 100 μm (véase Figura 3), para algunos autores esto puede cambiar un poco.

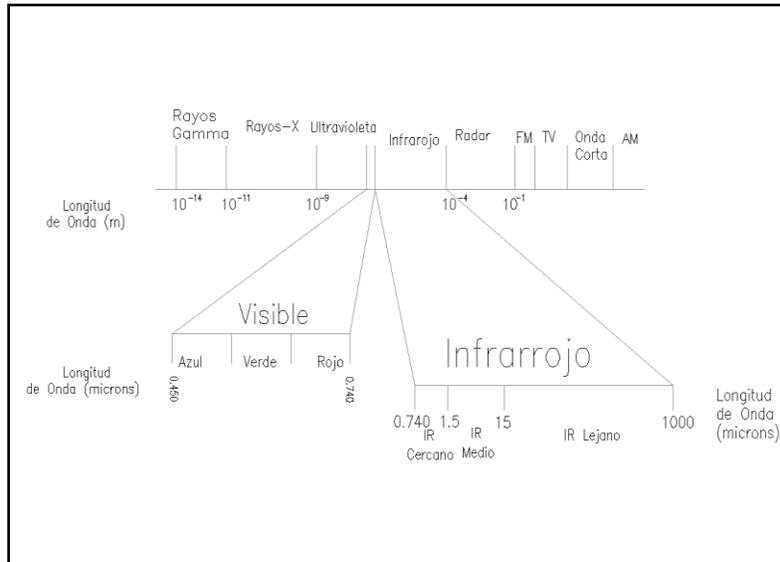


Figura 3. Diagrama del Espectro Electromagnético, al lado inferior derecho, el espectro en el infrarrojo, bandas donde se manifiestan las mayorías de las temperaturas de la Tierra.

SST (Sea Surface Temperature – Temperatura de la Superficie del Mar)

Debido a que los cuerpos que tienen energía (para los objetivos particulares de este proyecto: energía calorífica) emiten la misma en forma de ondas electromagnéticas y existen sensores que pueden detectar dicha manifestación en un ancho de longitudes de onda que correspondan, la temperatura de la superficie de la Tierra puede ser detectada por los sensores montados en los satélites. La temperatura calculada a través de datos de radiancia (radiación electromagnética), en este caso, provenientes de satélite, se le conoce con el nombre de temperatura de brillantez. Cuando se refiere a la temperatura de la superficie del mar es regularmente asociada con sus siglas en inglés SST.

El procedimiento para obtener los datos generalmente consiste en obtener la imagen que se desea, esto, considerando en primer lugar las bandas que nos interesa medir. Las imágenes vienen afectadas por un efecto atmosférico que generalmente forma parte del pre-procesamiento. Este efecto atmosférico es producido por los fenómenos que ocurren con las ondas electromagnéticas al interactuar con las partículas suspendidas en la atmósfera. Los materiales pueden interactuar en dispersión, transmisión y/o absorción de la onda.

Los datos que provienen del satélite generalmente vienen como valores en número digitales (Dn – ‘*Digital Numbers*’), aunque también se encuentran como valores de radiancia, que es una medida física absoluta de la brillantez del medio. Cuando las mediciones están en números digitales, se transforman a radiancia para poder hacer operaciones con valores que representen cantidades físicas absolutas. Para la transformación a radiancia desde números digitales, se utiliza una ecuación lineal que contiene algunos datos que las imágenes llevan, regularmente, dentro de sus metadatos (archivos de texto que contienen diferentes especificaciones técnicas de la toma de la imagen, por ejemplo: hora y día de adquisición, número de bandas, límites de longitudes de onda para las bandas, etcétera). La ecuación tiene la forma siguiente:

$$L(DN) = ((L_{max}-L_{min})/255) * DN + L_{min}$$

o

$$L(DN) = \text{desfase} + \text{ganancia} * (DN)$$

Donde L es la radiancia, L_{max} y L_{min} son la máxima y la mínima radiancia medidas sobre el ancho de cada banda y, DN es el número digital de cada uno de los píxeles y depende de la resolución radiométrica del sensor. En algunos casos las especificaciones del sensor vienen como desfase (offset) y ganancia (gain), como se muestra en la segunda ecuación de arriba. La resolución

radiométrica de Landsat es de 8 bits lo que significa que podemos tener 255 valores de DN aparte del valor nulo ('cero').

Todo lo anterior es necesario para poder expresar los valores de la imagen en términos cuantificables, ya que la ecuación que se utiliza para calcular la temperatura a partir de valores de radiancia necesita esas cantidades. La ecuación para calcular la temperatura fue desarrollada por Planck y se basa en el concepto de radiancia de cuerpo negro. De la ecuación se puede sacar una temperatura expresada en grados Kelvin (escala absoluta de temperatura), aunque como anteriormente se mencionó, las temperaturas tienen una mayor o menor manifestación a cierta longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético dependiendo de su energía (mayor temperatura = mayor energía). Un esquema del proceso de la transformación de la imagen desde números digitales hasta temperaturas se muestra en la Figura 4.

Existen otros algoritmos para el cálculo de la temperatura que emplean bandas muy cercanas entre sí, con las cuales se obtiene la temperatura mediante la función de Planck, que con la solución de ecuaciones de primer orden se obtienen coeficientes para generalizarlas. El programa Idrisi procesa la temperatura por medio de un algoritmo igual a la función inversa de Planck (Eastman, J. Ronald, 2006); sin embargo los algoritmos que emplea SeaDAS, por ejemplo, utilizan varias bandas, identificada como un cálculo de temperatura multicanal (OceanColor Web, 2009).

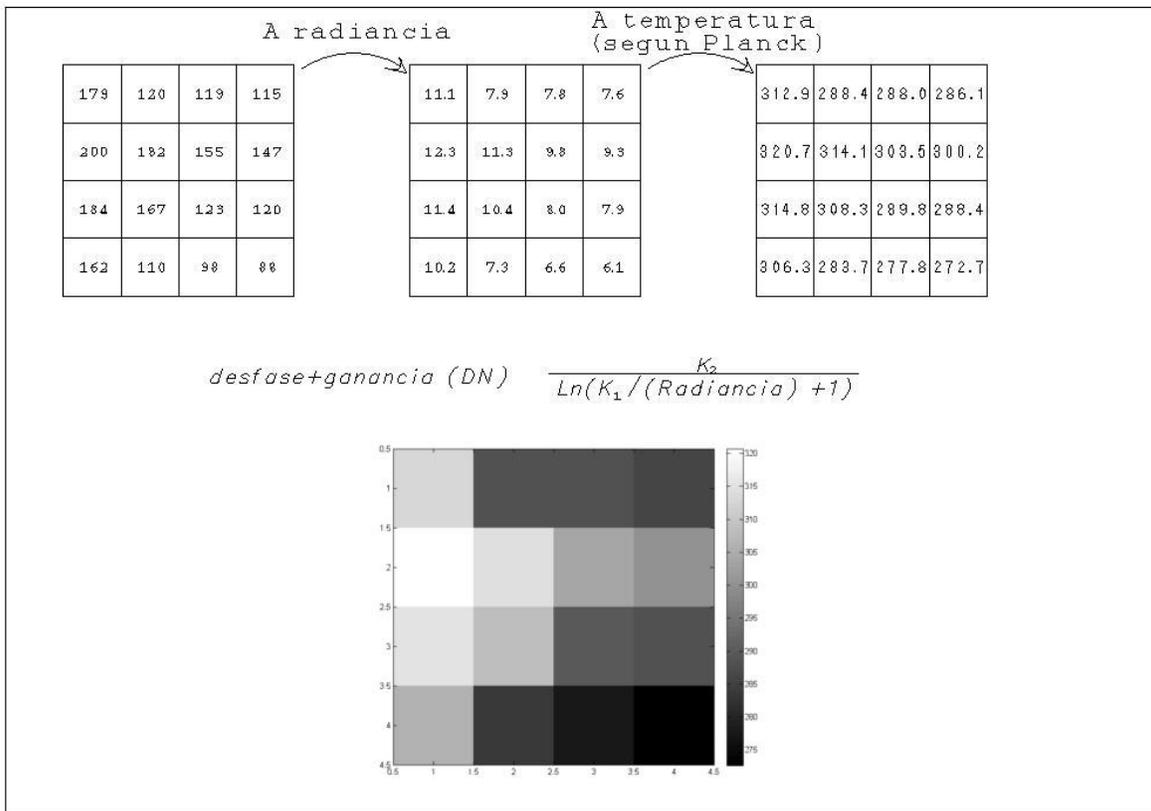


Figura 4. Esquema del procesamiento de las imágenes para la obtención de temperaturas. Arriba, de izquierda a derecha: valores digitales (Dn – Digital Numbers); los valores en radiancia, convertidos en este ejemplo con los parámetros de Landsat ETM; y valores de temperatura de superficie en grados Kelvin. Abajo una representación en escala de grises de la matriz de temperatura.

Series de Tiempo y Conceptos de Análisis Estadístico

Las series de tiempo son una herramienta útil para el análisis de fenómenos que van cambiando a lo largo del tiempo, éstas consisten en la representación de algún dato distribuido en un punto específico o en el espacio a lo largo de un tiempo. Las series son comúnmente representadas mediante gráficas del dato estudiado contra el tiempo. El estudio de series de tiempo puede ser empleado para análisis de cualquier evento que tenga algún comportamiento “aleatorio” a lo largo del tiempo. Los análisis de series de tiempo regularmente buscan el pronóstico de los eventos mediante los datos que se tienen, con estos datos se busca la relación con el tiempo para determinar un comportamiento característico que ayude para llegar al objetivo principal.

El análisis estadístico es una herramienta muy útil para el estudio de las series de tiempo; por ejemplo, la media marca una tendencia constante de los datos. Dentro del análisis estadístico básico están las medias, las varianzas y la desviación estándar de las muestras.

Las medias definen el valor de mayor probabilidad; las varianzas muestran que tanto se desvía una muestra de la media, que tan separados se ven los valores de su valor medio; y finalmente la desviación estándar, que está relacionada directamente con la varianza, sólo que difieren en que en la desviación estándar los valores son directamente aplicables a las mediciones de la muestra. En resumen, la estadística nos permite catalogar una muestra y poderla definir mediante valores simples que representen toda la muestra. Otros parámetros que pueden ser utilizados para la clasificación de una muestra en tiempo (serie de tiempo) es la obtención de sus valores máximos y mínimos.

METODOLOGÍA

Para la elección de las imágenes de satélite se tomaron varios criterios de importancia, para la correcta representación en la superficie del mar de las anomalías termales.

Tabla 1. Resolución espectral, espacial y temporal de los sensores utilizados.

Sensor	Banda(s) Térmicas	Resolución Espectral micrómetros	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal
AVHRR (NOAA)	1 2 3A 3B 4 5	0.58 - 0.68 0.725 - 1.00 1.58 - 1.64 3.55 - 3.93 10.30 - 11.30 11.50 - 12.50	1090	6 veces al día
MODIS (NASA)	1 2 . . 31 32 . . 35 36	620 - 670 841 - 876 . . 10.78 - 11.28, 11.77 - 12.27 . . 13.785 - 14.085 14.085 - 14.385	(banda 1-2) 250 (3-7) 500 (8-36) 1000	2 veces al día por cada sensor (Terra y Aqua)
Landsat TM (NASA)	1 2 3 4 5 6 7	0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 10.40 - 12.50 2.08 - 2.35	30 30 30 30 30 120 30	2 veces al mes
AVHRR *	1 2 3A 3B 4 5	0.58 - 0.68 0.725 - 1.00 1.58 - 1.64 3.55 - 3.93 10.30 - 11.30 11.50 - 12.50 25	6 veces al día

El primer parámetro que se tomó en cuenta fue la resolución espectral de las imágenes. Tomando en cuenta las temperaturas registradas en la superficie del mar para esa zona las bandas de interés para la detección de las variaciones de temperatura estuvieron dentro de la zona conocida como

infrarrojo térmico.

Para encontrar la mejor opción, se buscó entre varios sensores montados en distintos satélites (*Tabla 1*). Los sensores mencionados muestran datos que sirvieron para llegar a análisis más avanzados como descripción estadística de los datos (medias, varianzas, máximos, mínimos). Sin embargo, se analizaron las especificaciones técnicas de más sensores para determinar si el uso de los mismos era correcto para el estudio. Al encontrar la evidente deficiencia de los mismos para este caso se optó por no continuar con los análisis posteriores.

Las imágenes se manipularon con dos tipos de software para análisis de imágenes de satélite: Idrisi en su versión Andes (15.00) y SeaDAS (descargada en noviembre del 2008 de <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) en su versión más reciente, y que es un software libre que corre en plataformas tipo Linux que sirve para procesar imágenes de satélite y obtener distintos datos del mar (temperatura de superficie del mar, concentración de clorofila, color de mar, etc.).

Para algunas imágenes se tuvo que hacer el procedimiento correspondiente para obtener sus valores de Temperatura de Brillantez, esto es: sacar valores de radiancia a partir de números digitales y obtener temperatura a partir de la radiancia. En otros casos, simplemente se hizo una parte de este procedimiento. Sin embargo, en la mayor parte de los procedimientos computacionales que se llevaron a cabo, no se entro más que en darle la instrucción al programa para que éste automáticamente diera los valores de interés, en este caso, temperatura de brillantez.

Se sacaron las matrices correspondientes y se vaciaron en tablas para su posterior análisis estadístico en hojas de cálculo, donde se obtuvieron series de tiempo de temperatura junto con algunos otros datos estadísticos.

El primer objetivo buscado con las imágenes de temperatura fue poder construir matrices de mínimo 3x3 píxeles y hasta 7x7 en el mejor de los casos, centradas en el píxel que contenía las ventilas.

AVHRR y MODIS

Las AVHRR fueron las primeras en ser analizadas debido a que por su resolución temporal, definían un buen panorama para encontrar las anomalías. Se hicieron recortes a ventanas de 3x3 píxeles con el píxel central sobre las coordenadas de las ventilas hidrotermales localizadas en campo (matrices de 3x3). Sin embargo, los píxeles y la resolución espacial de la imagen no permitían tener datos en la parte norte de la ventana de recorte, ya que las ventilas se encuentran aproximadamente a 420 m de la costa, con lo que la resolución de 1 Km que tienen ambas imágenes (AVHRR 1090 m y MODIS 1000 m) no es suficiente para tener píxeles con valores de temperatura sobre la superficie del mar que se encuentren hacia el norte de las coordenadas de las ventilas hidrotermales, los valores obtenidos para esas coordenadas hacia el norte en el caso de las AVHRR representan promedios de temperatura sobre el continente y para las MODIS analizadas con el software SeaDAS no tienen valores, ya que los archivos descargados venían con una máscara sobre el continente.

*Landsat TM****

Se descargaron imágenes Landsat 5 TM de la página '<http://glovis.usgs.gov/>' que pertenece al USGS. Se observaron distintas series de imágenes buscando conservar la mayor continuidad en tiempo tomando en cuenta las limitaciones de la resolución temporal de 16 días. Si existieran condiciones ideales se esperaría tener del orden de 24 imágenes anuales; sin embargo, esto no se

logró debido a la presencia de nubes que en muchas ocasiones interfirieron la calidad de las imágenes y la visualización de la zona de interés. Se pudo obtener una buena serie a lo largo de 1999; a partir del 2 de enero se logró construir una serie de 19 imágenes hasta el 20 de diciembre del mismo año, con características suficientes para ser analizadas en una serie de tiempo para el área de estudio. También se añadió a esta serie una imagen extra del 21 de enero del 2000 para poder tener una interpolación de comportamientos de la temperatura hacia finales del año 1999 y principios del 2000.

Las imágenes fueron analizadas por medio de Idrisi Andes, en donde se recortaron a ventanas de 7x7 píxeles centradas en las coordenadas de las ventilas hidrotermales, se eligió este tamaño de matriz porque la resolución espacial de la imagen Landsat 5 TM permitía tener 3 píxeles hacia el norte del píxel central aún dentro del mar, esto es importante ya que el análisis del cambio de temperatura no se consideró relevante al tomar una matriz mixta de valores de temperatura sobre el mar y otros sobre tierra, ya que se trató de analizar un medio homogéneo para facilitar la descripción del fenómeno del movimiento de las temperaturas. Con las matrices de datos de las imágenes se elaboró una lista de temperaturas en hojas de cálculo para graficarlas y compararlas entre si.

Para comparar las series de temperatura del píxel central con los demás, se graficaron los promedios de temperatura de todos los píxeles sin contar el central para comparar este promedio con la temperatura del central a lo largo del tiempo, así se obtuvo la gráfica de la Figura 5. De las ventanas de 7x7 obtenidas se generaron nuevas matrices pero con las diferencias de temperatura con respecto de píxel central para determinar si se observaba alguna variación importante de la temperatura de los alrededores con respecto del píxel central.

Se restó la temperatura asociada cada uno de los píxeles a la temperatura asociada al píxel central, de esta manera las diferencias positivas resultantes representaron temperaturas más bajas que las del centro, lo cual se espera si tomamos como una hipótesis verdadera que las ventilas están calentando el agua de la superficie en un área determinada encima de su localización. Con estas nuevas matrices se construyeron nuevas imágenes y con la ayuda de un video se analizó el comportamiento de las temperaturas en un ciclo anual.

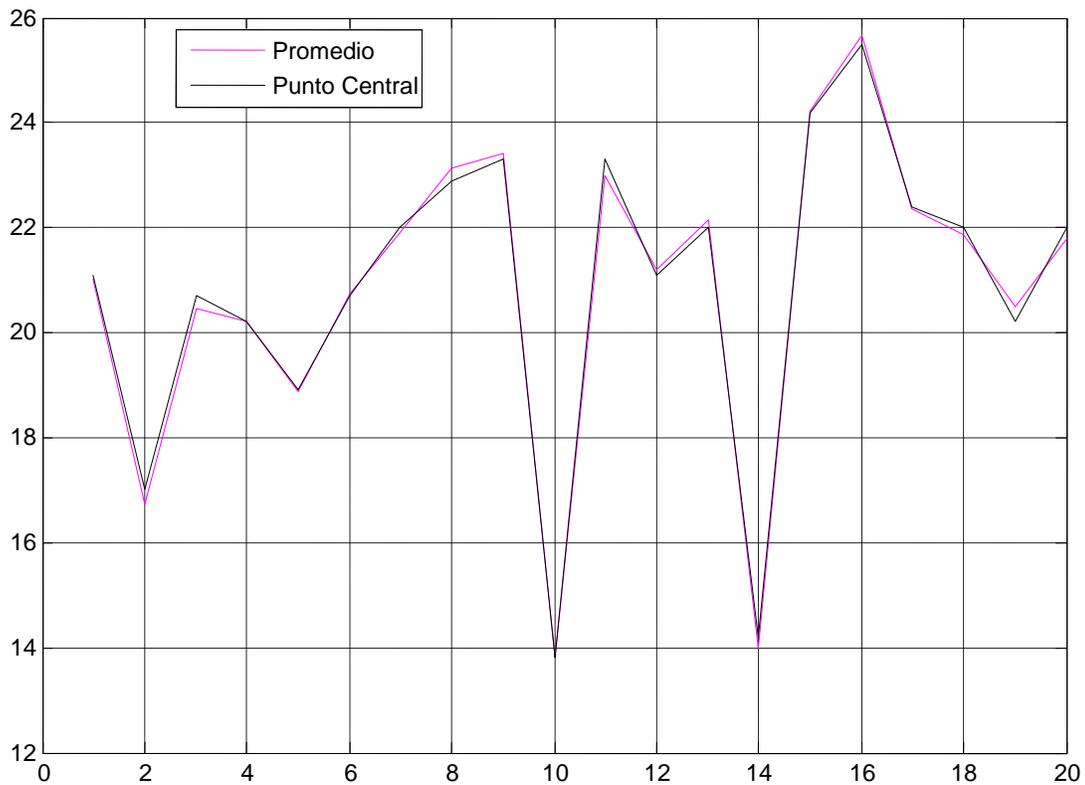


Figura 5. Promedios de temperatura para imágenes Landsat 5 en 1999 (línea magenta) y temperatura del píxel central (línea negra). La serie empieza en el valor 1 del eje horizontal, 2 de enero de 1999; acaba en 20, 21 de enero del 2000; 20 imágenes.

AVHRR (modificado)

Las imágenes AVHRR 'modificadas' fueron facilitadas por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. El procedimiento mediante el cual se mejoró la resolución espacial de las imágenes para los datos de temperatura fue un método desarrollado por el Instituto de Geografía y no es tema de este trabajo de tesis.

Se manipularon datos geofísicos de temperatura de brillantez. Se obtuvieron 49 datos distribuidos alrededor de un píxel central con las coordenadas de las ventilas hidrotermales para 367 días (367 mallas con 49 datos de temperatura cada una). Se organizaron dichos datos en una malla de una hoja de cálculo para poder manipularlos y buscar una relación de los mismos con la localización de las ventilas. Como se presentaban datos perdidos en algunos píxeles consecuencia de la presencia de nubes, se interpolaron linealmente los datos perdidos para poder obtener series continuas para cada uno de los píxeles, al interpolar se evitó sobrestimar la temperatura lo cual habría producido conclusiones confusas.

RESULTADOS

AVHRR y MODIS

Al analizar los datos obtenidos a partir de las imágenes AVHRR y las MODIS, no se pudieron observar anomalías de temperatura más allá de las presentes comúnmente en el mar. Las anomalías de temperatura registradas en estos sensores son el promedio de temperaturas vistas a un kilómetro cuadrado de área como mínimo. Para el objeto particular del trabajo realizado en este escrito no son útiles las imágenes con resoluciones espaciales de 1 Km. En la ventana '1) Zoom' de la Figura 6 se pueden observar claramente que las temperaturas en la zona de Punta Mita se mantienen en rangos similares entre sí, sin poder identificar anomalías evidentes.

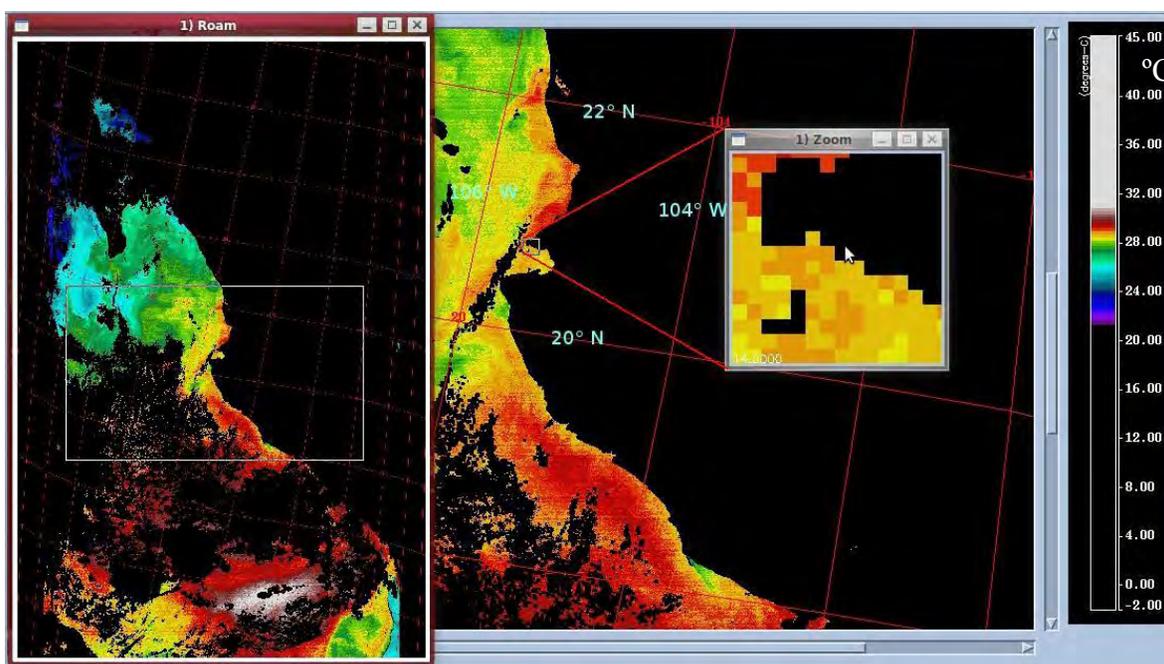


Figura 6. Imagen de temperatura sensor MODIS (Programa SeaDAS). De izquierda a derecha se tiene: imagen completa (ventana '1) Roam'), en el centro y de trasfondo un acercamiento de la Bahía de Banderas, y finalmente la ventana '1) Zoom' un acercamiento a Punta Mita. La imagen tiene aplicada una máscara sobre el continente (color negro), aunque las nubes también aparecen en el mismo color. Las imágenes MODIS y AVHRR tienen aproximadamente la misma resolución espacial (1 Km).

Landsat TM

El sensor Landsat tiene varias ventajas con respecto de la mayoría de los sensores. Este sensor cuenta con una resolución espacial de 120 m y también tiene la facilidad de la obtención de las imágenes de manera gratuita. Sin embargo, **también** posee una gran desventaja, el periodo temporal que existe entre la toma de imagen e imagen de aproximadamente 2 semanas, esto hace 2 tomas por mes. Debido a los fenómenos atmosféricos que ocurren en las regiones costeras y que fue el caso de la Bahía de Banderas, muchas de las imágenes se perdieron por estar cubiertas por nubes en el momento de la toma de la imagen. Se logró rescatar una serie de 20 imágenes distribuidas en el año, con ellas se produjeron imágenes de tipo raster con algoritmos de cálculo de temperatura y transformaciones previas de números digitales a valores de radiancia. En la Figura 7 se muestra una imagen de la serie analizada para Landsat 5, se observó una anomalía térmica ubicada en la parte suroeste de la imagen.



Figura 7. Imagen del 15 de septiembre. Anomalía de temperatura registrada con las imágenes Landsat 5 de 1999. La imagen se obtuvo al calcular la diferencia con respecto del punto central, los valores positivos representan temperaturas más cálidas que las del centro y los negativos temperaturas más frías. Se logra observar un punto más caliente que los demás, del lado inferior izquierdo de la imagen.

Las imágenes que se generaron sirvieron para observar cuantitativamente, mediante la ayuda de escalas de colores, la temperatura, las anomalías de temperatura que posiblemente pudieran estar ligadas a un efecto de las ventilas hidrotermales, no se observó relación clara. Como los píxeles de una imagen Landsat abarcan un área de 185 x 185 Km fue útil hacer un recorte de la imagen a una de 7 x 7 píxeles, centrada en la localización de las ventilas, lo que ayudó a observar anomalías en un radio de 420 m. Otra ventaja de recortar las imágenes fue el procesado de las mismas al tener un área más pequeña y, por lo tanto, tener menos número de píxeles, las operaciones de la imagen fueron más rápidas. También se pudieron obtener series de tiempo para cada píxel de la imagen. La comparación de las series de tiempo de los píxeles no logró mostrar anomalías que pudieran estar ligadas a las ventilas.

AVHRR (modificada)

Las imágenes que dieron mejores resultados fueron de las que inicialmente se tuvieron las imágenes recortadas a 7 x 7 píxeles. De ellas solamente se tenían las series de datos y con ellos se produjeron imágenes raster por medio del programa Idrisi.

Con la malla se produjo una serie de tiempo para el promedio de las temperaturas de los píxeles de alrededor de la ventila y se comparó con la serie del píxel central. Por otro lado, se graficaron cada uno de los píxeles en una sola exposición para buscar una tendencia cíclica anual de los datos manipulados (Figura 8). Las series de tiempo solamente mostraron un comportamiento cíclico de la temperatura de la zona de estudio. No se pudo encontrar más correlación de las ventilas con ninguno de los análisis aplicados a las series de tiempo, ni en conjunto ni tampoco píxel a píxel, para estas imágenes.

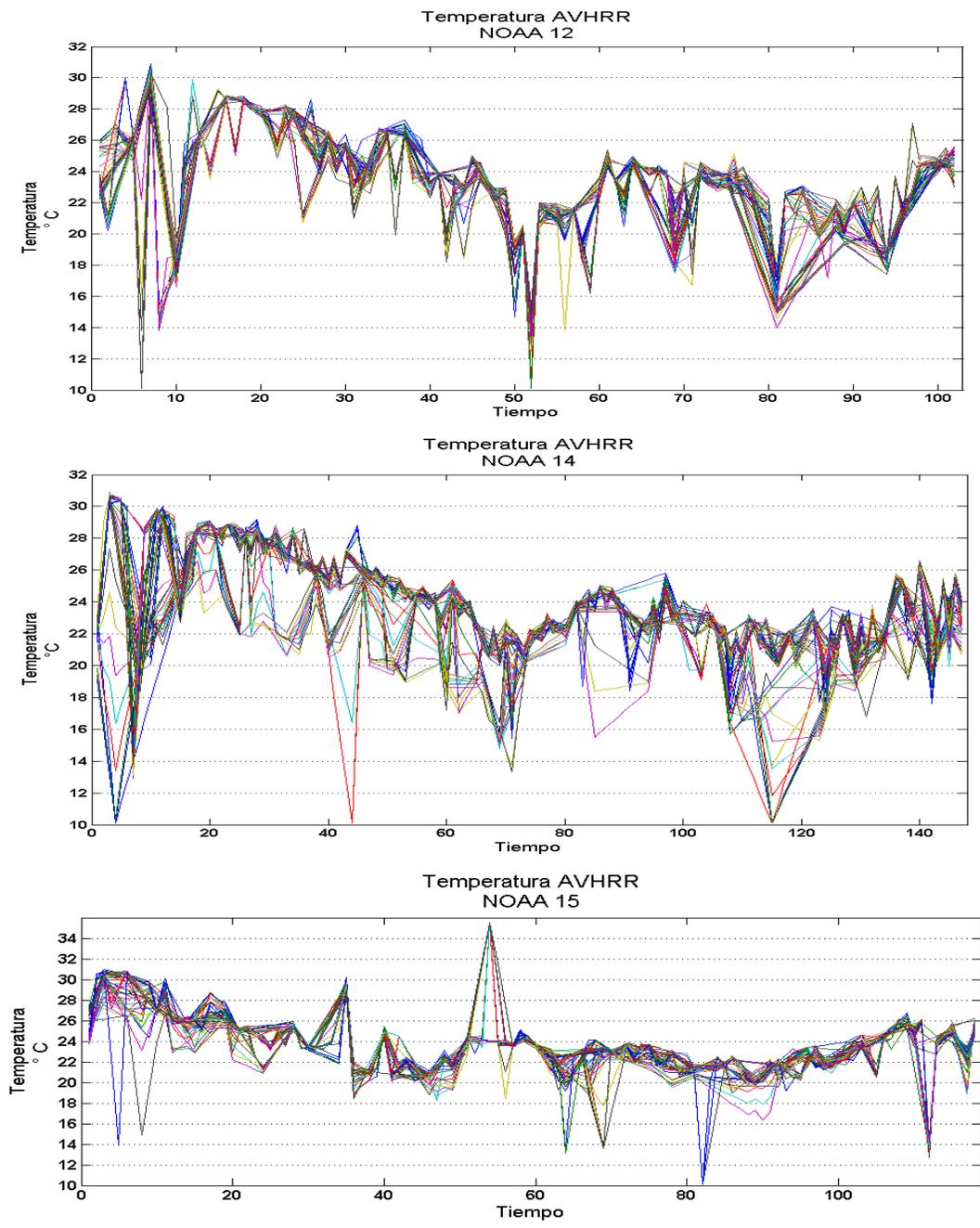


Figura 8. Series de tiempo de cada uno de los 49 píxeles, Temperatura (°C) contra Tiempo (días). Las gráficas son para cada sensor AVHRR montado en los distintos satélites de la NOAA, la escala de tiempo no es cuantificable debido a que representa cada medición sin importar su separación en el tiempo. Existen mediciones con separación de horas hasta de unos cuantos días, sin embargo el rango de todos los satélites ocupa aproximadamente las mismas fechas.

Para detectar anomalías de temperatura con un método más práctico se generaron imágenes a partir de los datos de temperatura con ayuda del software Idrisi Andes. Se introdujeron las mallas de datos de 9 x 9 para producir una imagen raster, obteniéndose así 367 imágenes. Con las imágenes AVHRR (modificadas) se armó una base de datos con mejor representatividad debido a su resolución temporal. Se obtuvieron los datos de distintos satélites con este mismo sensor, NOAA 12, NOAA 14 y NOAA15. Los datos de 7 x 7 originales fueron modificados al añadir los valores máximos y mínimos, del conjunto de todos los datos, al margen de cada imagen y así poder normalizar las variaciones de colores; de esta manera la escala de colores fue la misma para cada una de las imágenes. Se analizaron con este método, imágenes de temperatura y diferencias de temperatura con el píxel central.

A los datos numéricos se les hizo una caracterización estadística para buscar correlación de su localización con el comportamiento de la temperatura; se sacó la media, la varianza, desviación estándar, valores máximos y mínimos para la serie de cada uno de los píxeles. Los resultados numéricos obtenidos se muestran en la Figura 9 con la ayuda de una escala de grises y la representación de cada uno de los datos (máximos, mínimos y media) por medio de imágenes.

Los análisis estadísticos de las muestras por cada píxel demostraron tener correlación de la ubicación de las ventilas con las temperaturas mínimas registradas en toda la serie; mientras se tenían temperaturas mínimas en el trasfondo del mar de 10.1°C, en los píxeles centrales la temperatura no bajó más allá de 13.6°C (Figura 9).

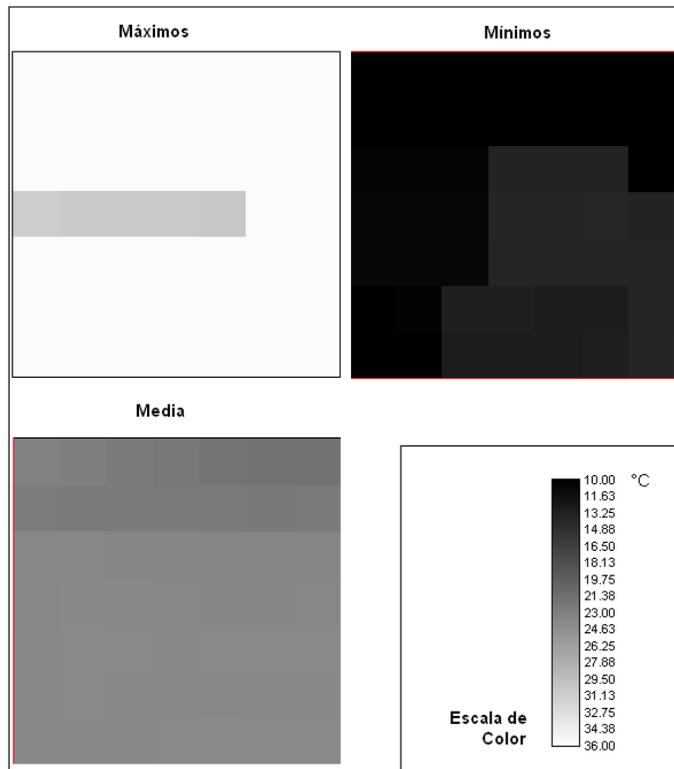


Figura 9. Estadística descriptiva de los datos de las imágenes AVHRR (modificada). Los resultados para las series de 367 datos para cada píxel se muestran en las imágenes. Los encabezados de cada cuadro definen los datos de cada uno de ellos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de datos de temperatura de superficie del mar con base en imágenes de satélite es útil para el desarrollo de metodologías para la localización de ventilas hidrotermales de forma remota. Esto economiza la exploración y da herramientas para la planeación de visitas a campo posteriores. Las ventilas hidrotermales ubicadas en la zona de estudio, Punta Mita, se lograron observar con base en correlaciones de temperaturas altas detectadas por los sensores remotos. El sensor remoto que mostró una correlación ideal de anomalías de temperatura con respecto de la ubicación de las ventilas fue el montado en NOAA, sensor AVHRR con resolución de 25 m. Las anomalías presentadas por los sensores MODIS, Landsat 5 y las AVHRR con resolución de 1 Km, no mostraron detalles contundentes de la localización de las ventilas.

El análisis de las imágenes provenientes sensores MODIS no mostró correlación alguna ni se encontró alguna coherencia de las anomalías de temperatura relacionada a la ubicación de las ventilas. Las imágenes AVHRR con resolución de 1 Km no mostraron ningún resultado útil para el propósito del trabajo, debido también a su baja resolución espacial, igualmente en el caso de las imágenes MODIS.

Desde los planteamientos iniciales que se propusieron para este trabajo, se presentó analizar series de por lo menos un año entero completo, abarcándolo de cualquier manera pero buscando la continuidad en el tiempo. El analizar un año implicaría incluir todas las variaciones estacionales que se pudieran encontrar en ese periodo (primavera, verano, otoño e invierno, de forma general). Los cambios de temperatura que se producen con los cambios estacionales, pueden enmascarar, o en caso contrario, contrastar las anomalías termales. La resolución temporal de imágenes Landsat 5 tienen el problema de no ser suficientes (16 días entre cada imagen) para mapear a gran detalle el

fenómeno termal al paso del tiempo, aunado a esto la pérdida de imágenes por presencia de nubes hace aún más difícil armar una serie temporal anual que sea representativa. Es probable que debido a lo anterior (baja resolución temporal de Landsat 5) no se lograra encontrar alguna correlación, aunque también existe la posibilidad de que la resolución espacial, aunque no es muy pobre, también influyera. Sin análisis de series de tiempo se lograron encontrar algunos datos coherentes con la ubicación de las ventilas, en una imagen de la serie se observó una anomalía termal alta ubicada en la parte suroeste de la imagen; sin embargo, no se puede asegurar que sean completamente debidos a la presencia de las mismas.

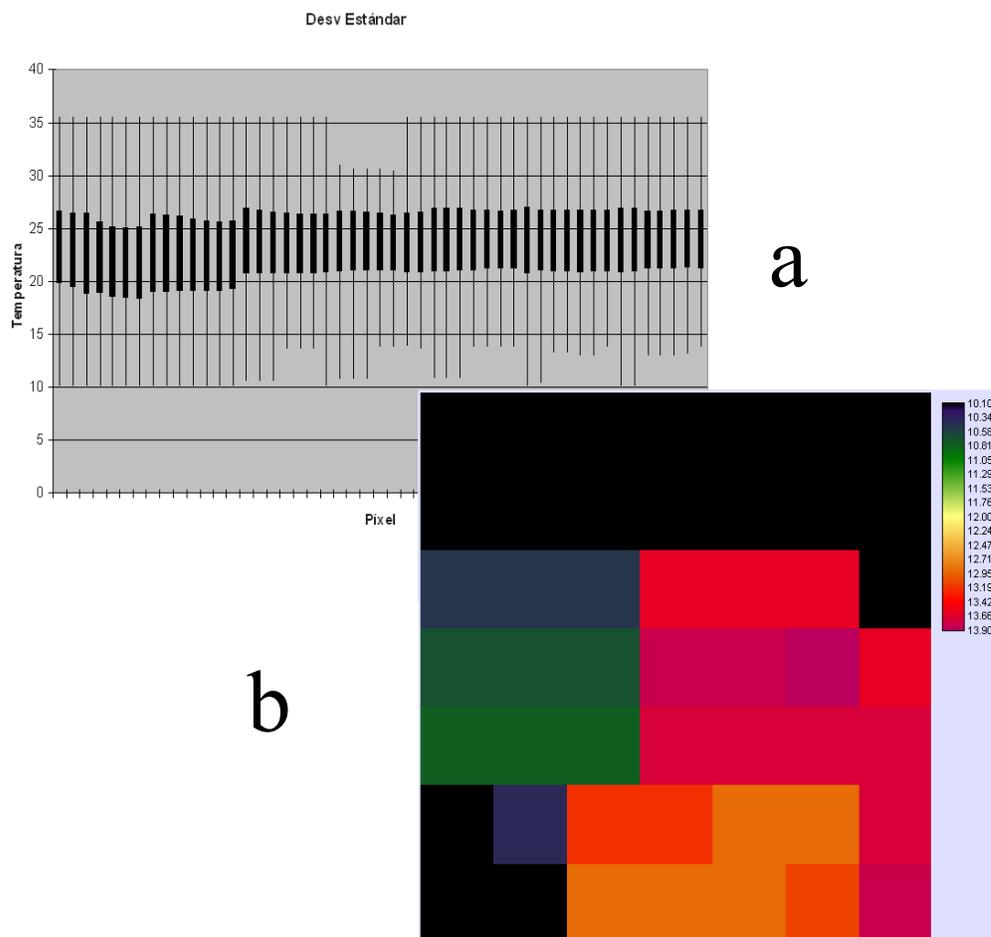


Figura 10. Resultados mostrados por el análisis estadístico de los datos de cada uno de los píxeles; a) gráfica que muestra la varianza (barra gruesa), su media (punto a la mitad de las barras gruesas) y, el valor mínimo y el máximo (la línea delgada que atraviesa la barra gruesa); b) imagen generada a partir de los valores mínimos de cada píxel. Tanto en la gráfica como en la imagen se puede observar que el valor mínimo del píxel central es más alto junto con los de algunos píxeles hacia el lado derecho (E - este)

Con base en el número tan grande de muestras que se obtuvo fue posible realizar varios análisis, que tuvieron mayor representatividad, con ellas. Se pudieron observar contrastes de temperaturas mínimas con la ayuda de un trasfondo estacional (Figura 10). Con el análisis de los comportamientos termales que se observaron previamente, se puede determinar que la diferencia de temperaturas es considerable para poder concluir que existe una anomalía térmica; de forma un poco más clara se muestran los resultados en la Figura 11 con los datos de las temperaturas mínimas y máximas registradas para cada píxel. En la Figura 10b es posible observar que se distribuyeron temperaturas mínimas más cálidas hasta el límite sureste de la imagen que se tenía, la temperatura en estos puntos no bajó más de 13.6°C debido a la posible influencia de las ventilas.

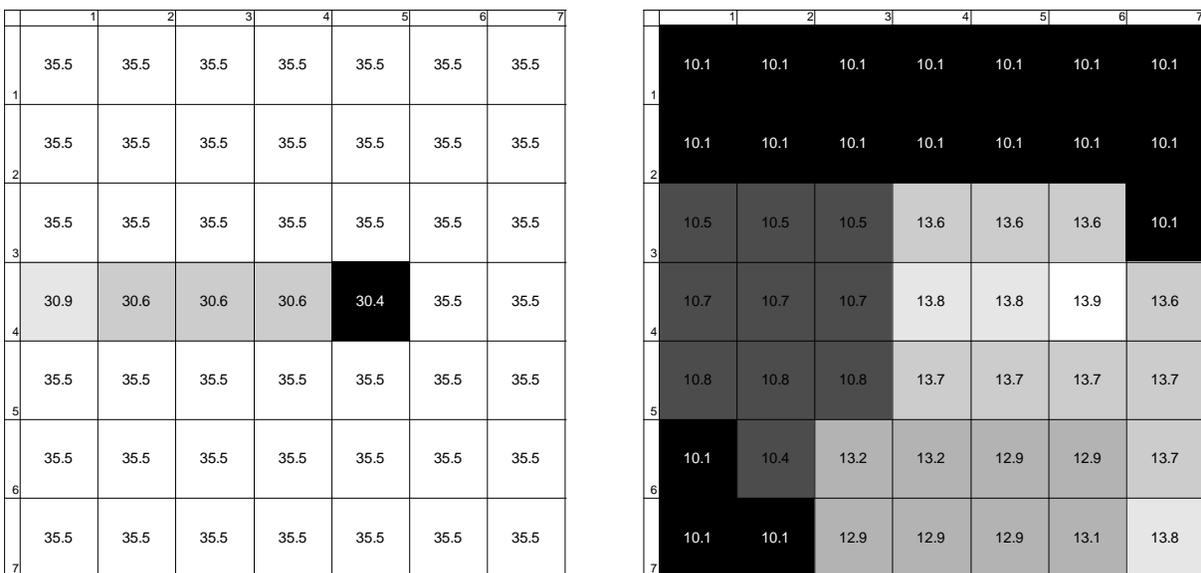


Figura 11. Matrices de datos de las temperaturas máximas y mínimas registradas en todo un año con tres distintos satélites NOAA (12, 14, y 15). Del lado izquierdo las temperaturas máximas y del derecho las mínimas. No se observa una coherente relación de la posición y la temperatura en las temperaturas máximas, aunque se esperaría tener temperaturas más altas cerca de las ventilas no es así. En el diagrama de las temperaturas mínimas registradas en cada píxel se observa claro que las temperaturas mínimas más altas se distribuyen hacia la parte inferior derecha del cuadro (parte sureste).

CONCLUSIONES

La decisión de emplear imágenes de satélite para localizar ventilas hidrotermales es dependiente del área de afectación en la temperatura de dichas ventilas así como de la temperatura que generan dichas ventilas. Las imágenes de resolución espacial de 1 Km que se utilizaron aquí no fueron de utilidad porque la temperatura generada por la fuente comprende un área de afectación más pequeña que el área abarcada por este tipo de sensores.

Las anomalías térmicas fueron detectadas por medio de las temperaturas mínimas registradas en cada uno de los píxeles, dando como resultado que las áreas afectadas por las ventilas tuvieran temperaturas mínimas mayores que las del resto (“valor de trasfondo”), esto debido posiblemente a que las temperaturas generadas por las ventilas en el volumen de agua no es suficiente para elevar la temperatura por arriba de lo que pueden los cambios estacionales.

El análisis estadístico para cada píxel, desarrollado para el análisis de las temperaturas de la zona en el estudio de este trabajo, fue el que dio mejores resultados para la combinación de las características mezcladas en la zona estudiada, posiblemente no tenga el mismo efecto sobre ventilas en otras partes del mundo por las diversas características de sitio que se puedan presentar, como los son la temperatura promedio del mar, la profundidad de las ventilas, el clima en la zona, etcétera. Sin embargo, puede servir como guía para desarrollar otros métodos.

Los resultados mostrados por las temperaturas máximas solamente pueden significar que la energía (calor) que generan las ventilas no es suficiente para elevar la temperatura de la superficie del mar más de lo que los fenómenos estacionales lo hacen, ya que la temperatura máxima registrada en cada píxel es igual en casi todos. Por eso solamente es posible ver resultados con las temperaturas

mínimas, las temperaturas más bajas registradas en cada uno de los píxeles no es uniforme, existe una zona en donde las temperaturas no bajan de cierta temperatura. Así, entonces, existe un fenómeno que mantiene caliente esta zona, posiblemente, las ventilas hidrotermales.

Es necesario hacer una investigación más local de las corrientes con el propósito de poder sustentar la hipótesis que se presentó de los movimientos de las temperaturas ocasionados por las mismas corrientes, porque en la documentación consultada para las corrientes de la Bahía de Banderas de forma regional, las corrientes predominan hacia el noroeste de esta zona; sin embargo, los resultados muestran que las temperaturas cálidas se mueven al sureste, posiblemente por la cercanía a la costa donde se generan vórtices que cambien localmente las corrientes y las hagan más complejas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Prol-Ledesma, Rosa María; Canet, Carles; Melgarejo, Joan Carles & Núñez-Cornú, Francisco; 2000. Mineralogy of a shallow hydrothermal submarine center near Punta Mita (Western Mexico). *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, pp. 1599-1604.
2. Álvarez, Román, 2007. Submarine topography and faulting in Bahía de Banderas, México. *Geofísica Internacional*, Vol. 46, Num. 2, pp. 93-116.
3. Núñez-Cornú, F.J.; Prol-Ledesma, R.M.; Cupul-Magaña A. & Suárez-Plascencia, C., 2000. Near shore submarine hidrotermal activity in Bahia Banderas, western Mexico. *Geofísica Internacional*, Vol. 39, Num. 2, pp. 171-178.
4. Prol-Ledesma, Rosa María; Canet, Carles; Tolson, Gustavo; García-Palomo, Armando; Miller, R.; Rubio, M.A.; Torres-de León, R. & Huicochea-Alejo, J.S.; 2003, Basaltic volcanism and submarine hydrothermal activity in Punta Mita, Nayarit, Mexico, in *Geologic transects across Cordilleran Mexico, Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting*, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico, March 30–31, 2003: Mexico, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial 1, Field trip 7, p. 169–182.
5. Sánchez-González, Susana, 2000; *Ictiofauna de la Bahía de Banderas Nayarit, Jalisco y Zonas Adyacentes, México*; Informe Final del Proyecto L156. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

6. United States Geological Survey, <http://edc.usgs.gov/>, página web, 1 de abril 2009.
7. NOAA Satellite and Information Service, <http://noaasis.noaa.gov/>, página web, 13 de abril 2009.
8. OceanColor Web, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, página web, 13 de abril 2009.
9. USGS Global Visualization Viewer, <http://glovis.usgs.gov/>, página web, 15 de abril 2009.
10. Eastman, J. Ronald, 2006. *Idrisi Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University.
11. LIBRO. Aguirre-Gómez, Raúl, México, 2002. *Los Mares Mexicanos a Través de la Percepción Remota*. Editorial Plaza y Valdes.