

Análisis Espectral de Nubes de Sal Originadas en las Cercanías De la Laguna de Mar Chiquita Utilizando Sensores Remotos

Por: *Diana Rodríguez - Silvana Carina Bolzi - Inés Velasco - Mónica Marino*

La extensión del espejo de agua de la laguna Mar Chiquita (Córdoba-Argentina) ha experimentado aumentos y disminuciones a lo largo de los años. Sin embargo, a partir del 2003, entró en un régimen de contracción, dejando expuestas grandes extensiones de suelo cubiertas de sal. A partir del 2006 las observaciones desde el espacio con distintos satélites permitieron documentar la presencia de nubes muy blancas originadas en la sal que es levantada desde el suelo cuando ocurren vientos de cierta intensidad. En este trabajo se presentan varios ejemplos de nubes de sal, documentados con imágenes del sensor MODIS (Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y utilizando datos AVHRR (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución o Advanced Very High Resolution Radiometer) de los satélites NOAA (Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera o National Oceanic and Atmospheric Administration) 18 y 19, los cambios observados en el espejo de agua de la Laguna entre los años 2006 y 2012 y se analizan dos eventos en particular. Para cada uno de ellos se analiza la respuesta espectral en las bandas reflectivas y las temperaturas de brillo, en forma individual o combinadas en índices. Si bien este estudio es de carácter exploratorio, los resultados obtenidos indican que ciertos índices usados en la literatura para identificar estas nubes no son aplicables en forma generalizada y es entonces necesario obtenerlos a nivel local. Para este trabajo en particular se encontró que el índice constituido por la diferencia de temperaturas radiantes en las bandas de 11 y 12 μm , sirve para distinguir y estudiar las nubes o tormentas de sal.

1.- INTRODUCCIÓN

En mayo de 2002 la República Argentina seleccionó a los Bañados del Río Dulce y la Laguna de Mar Chiquita, que abarcan alrededor de 996.000 hectáreas, en el norte de la provincia de Córdoba, asignándole el orden 11° en la Lista del Convenio de Ramsar, un tratado intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso ra-

cional de los humedales y sus recursos. [1]

Esta es la cuenca endorreica más grande e importante en la Argentina, y comprende la laguna de Mar Chiquita (uno de los mayores lagos de agua salada en el mundo, con aguas que oscilan entre salinas e hipersalinas), los pantanos expansivos del Río Dulce (o Río Petri) en la costa norte, y las bocas de varios ríos secundarios al sur.

El sitio es considerado uno de los humedales más importantes de la Argentina por la riqueza de su biodiversidad, comprendiendo un rango de agua dulce a muy salina. La zona es muy importante también desde el punto de vista antropológico por la presencia de numerosos yacimientos arqueológicos.

A partir del año 2006 se vienen registrando en forma creciente nubes de polvo de sal en el área de la laguna de Mar Chiquita. Estas nubes se generan a partir de las grandes playas cubiertas de sal que se han formado al producirse un rápido descenso del nivel del agua de la laguna a partir de 2003, momento en que alcanzó su máximo nivel histórico. A medida que el nivel de la laguna baja, las playas se hacen más extensas, y en agosto de 2012 cubrían una superficie aproximada de 3.300 hectáreas. Las grandes "plumas" de polvo y sal en suspensión se generan a partir de vientos con velocidades mayores a los 20 km por hora, aunque puede observarse la aparición de polvo en suspensión con velocidades menores. Estas plumas se pueden extender muchos kilómetros hacia el sur o el norte de la laguna u otra orientación, dependiendo de la dirección de los vientos. En casos extremos, se han registrado nubes que llegaron hasta Pergamino en la provincia de Buenos Aires, a unos 400 km desde su punto de origen en Mar Chiquita y hasta el sur de la provincia de Salta, a unos 800 km [2].

Las nubes de sal -también llamadas tormentas de sal-, se diferencian de las nubes o tormentas de polvo no sólo por su origen, sino también por su composición y el tamaño de las partículas. Además, son difíciles de predecir y controlar y pueden contaminar el aire, el suelo, el agua y los alimentos, así como corroer equipos o maquinarias; y causar enfermedades, produciendo una alteración perniciosa de los ecosistemas y del entorno natural [3]. Pero al igual que las tormentas de polvo,

interactúan con la radiación solar incidente reflejando, absorbiendo y emitiendo a la vez, por lo tanto interviniendo en el balance radiativo y consecuentemente en el clima. Sin embargo, el número de estudios realizados sobre las tormentas de sal, es mucho menor que sobre las tormentas de polvo, pese a que las primeras pueden tener un gran impacto ecológico.

Los datos obtenidos desde distintos sistemas satelitales han contribuido en forma muy importante a la detección, el monitoreo, la comprensión y el desarrollo de estrategias para la mitigación de numerosos fenómenos naturales de impacto desfavorable en el ambiente y la sociedad, como la presencia de altas concentraciones de partículas en la atmósfera [4] y [5]. Un ejemplo destacable es el problema del mar de Aral, para el cual los datos satelitales se usaron intensamente junto con los sistemas de información geográfica, tanto para su estudio como para proveer las bases necesarias para desarrollar medidas paliativas con sustento científico[6]. En este trabajo se documentan varios casos de nubes de sal originadas en el entorno de la Laguna de Mar Chiquita entre los años 2006 y 2012 con imágenes MODIS Aqua, y se analizan en detalle dos casos observados desde los satélites NOAA 18 y 19, con el sensor AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer/3).

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

Las imágenes MODIS fueron utilizadas para documentar la ocurrencia de tormentas de sal en el entorno de la Laguna de Mar Chiquita y se obtuvieron de la dirección web <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazard>.

Las imágenes NOAA, utilizadas en el presente trabajo, Tabla 2, fueron obtenidas en el Departamento Teledetección y

Aplicaciones Ambientales, GIDyC, del Servicio Meteorológico Nacional. Todas las imágenes fueron calibradas y se calcularon las reflectancias (ρ) y las temperaturas de brillo (TB), para las bandas que se detallan en la Tabla 1. Además, las imágenes fueron georreferenciadas usando proyección latitud-longitud, dato WGS-84.

Tabla 1. Bandas de los satélites NOAA 18 y 19.

Número banda (siglas)	Rango longitud en μm
B1 (VIS)	0.58-0.68
B2 (NIR)	0.72-1.10
B4 (IR)	10.30-11.30
B5 (IR)	11.50-12.50

Tabla 2. Detalle de las imágenes NOAA utilizadas.

Fecha	Hora UTC	Satélite
08/07/2012	19:30	NOAA -18
29/07/2012	19:01	NOAA -18
03/07/2012	18:04	NOAA -19 (laguna en baja)
04/07/2011	18:20	NOAA -18
07/07/2010	18:32	NOAA -19
09/08/2009	18:30	NOAA -19
28/08/2006	17:49	NOAA -18 (laguna normal)

Las dos primeras líneas de la Tabla 2 representan las imágenes que se utilizaron para hacer el análisis de las respuestas de las nubes de sal en las distintas bandas. El primer caso se originó con vientos prevalecientes del sector norte; el segundo, con vientos de dirección sur.

Las cuatro líneas siguientes de la Tabla 2, representan las imágenes que se usaron para observar la evolución del espejo de agua entre los años 2006 a 2012, que se redujo progresivamente, dejando expuestas al norte de la laguna extensas playas cubiertas de finas partículas de polvo y sal.

Como ejemplos extremos representativos se tomaron la del 03/07/2012 (Fig. 1) y la del 28/08/2006 (Fig. 2).

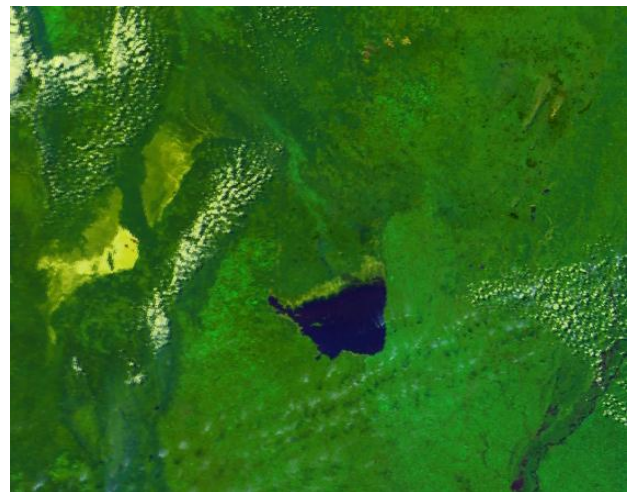


Figura 1. Imagen RGB 124, sensor AVHRR/3, del 28/08/2006.

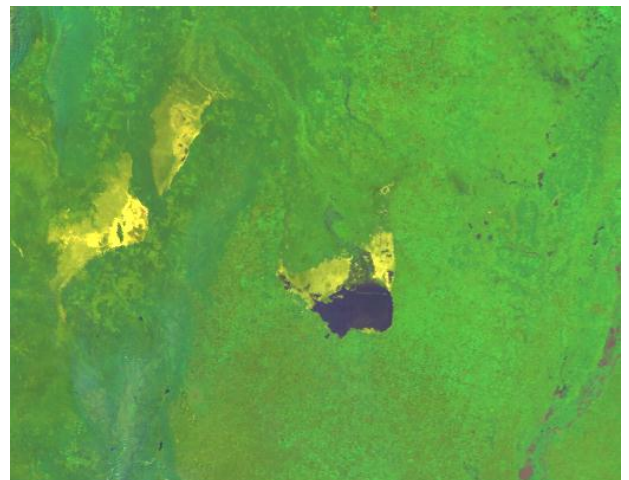


Figura 2. Ídem figura anterior para el 03/07/2012.

La identificación inicial de las nubes se realizó a través de una inspección visual de las imágenes en falso color (RGB 124). Posteriormente se inspeccionaron las imágenes banda por banda, convertidas a reflectancias (ρ_{B1} y ρ_{B2}), a temperaturas radiantes (TB4 y TB5), a temperatura de superficie (T_s) y a diferencia de temperatura (TB4-TB5). Luego se realizó un análisis de las distintas variables, en varios sectores de la nube, en el caso del 29/07/2012 (Fig. 9) y sobre un sector en el caso del 08/07/2012 (Fig. 18), a lo largo de las transectas que se marcan sobre las mismas.

Las imágenes de la temperatura radiante para las bandas 4 y 5 (TB4 y TB5), se obtuvieron a partir de las imágenes en infrarrojo térmico, calibradas, invirtiendo la función de Planck y de la temperatura de superficie (T_s) [7].

El espejo de agua de la laguna ha oscilado a lo largo de los años, y en las tres últimas décadas esta variación ha sido documentada con imágenes de satélite (ver por Ej. [8] y [9]). En las Figuras 1 y 2 se puede apreciar el cambio observado entre 2006 y 2012. En este período, la superficie de agua fue disminuyendo paulatinamente en forma constante, dando lugar a la formación de amplias playas cubiertas por finas partículas de polvo al norte de la misma. La comparación de las figuras 1 y 2 permite observar lo descrito anteriormente.

En la Figura 3 se muestran las estaciones meteorológicas más cercanas a la Laguna de Mar Chiquita, cuyos registros fueron consultados para determinar el estado de la atmósfera durante los dos eventos que se analizan.

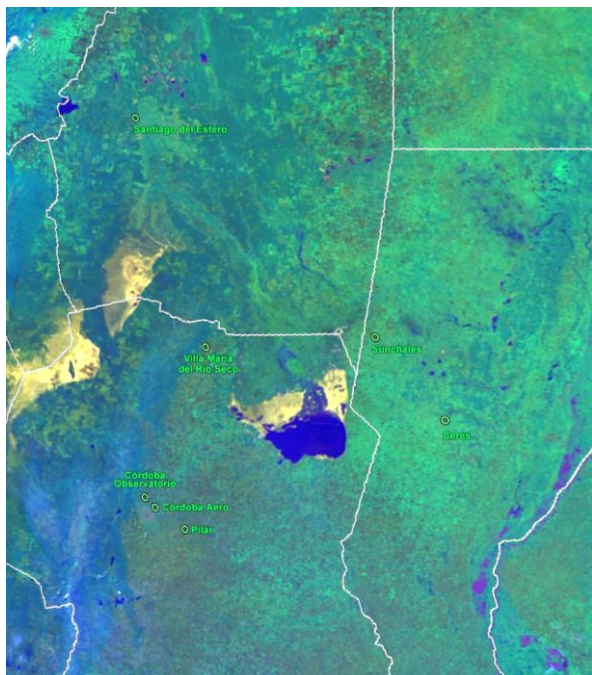


Figura 3. Ubicación de estaciones más próximas a la Laguna de Mar Chiquita de las que se obtuvieron datos meteorológicos.

Las condiciones meteorológicas y climáticas que prevalecieron en el período, con altas temperaturas, escasas precipitaciones y vientos fuertes, favorecieron el proceso de evaporación, siendo este efecto además, reforzado por posibles desvíos de agua desde los ríos que alimentan la laguna. Con estas condiciones, los vientos, a partir de cierta intensidad, desprenden y levantan las pequeñas partículas de las playas y las arrastran a grandes distancias, dependiendo de su intensidad; las condiciones de inestabilidad termodinámica cooperan para que las mismas se desplacen hacia alturas mayores.

Ejemplos de casos de nubes de sal observados desde satélites en el período 2006-2012

Durante este período (2006-2012), fueron documentados varios episodios de nubes de sal en las cercanías de la Laguna de Mar Chiquita, tanto por los satélites NOAA sensor (AVHRR/3), como por los AQUA y TERRA (sensor MODIS). En las Figuras 4 a 8 se muestran algunos ejemplos capturados por el sensor MODIS. La mayoría de los ejemplos observados y documentados, acontecieron en los meses de julio y agosto (invierno) y en condiciones de viento predominante del sector sur.



Figura 4. Imagen AQUA-MODIS color natural. 27/07/2006.

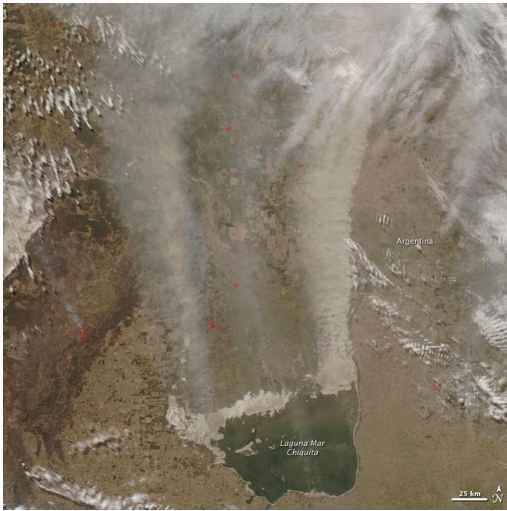


Figura 5. Ídem Fig. 4 para el 10/07/2009.



Figura 8. Ídem Fig. 4 para el 29/07/2012.



Figura 6. Ídem Fig. 4 para el 07/07/2010.



Figura 7. Ídem Fig. 4 para el 08/07/2012.

3.- ANÁLISIS DE DOS CASOS

Nube de sal observada el 29/07/2012

En la Figura 9 se puede observar la nube de sal en una imagen en falso color (RGB 124) y en la Figura 10, la imagen reflectiva (NIR) para este caso. En ambas imágenes se aprecian las plumas de sal que se originan sobre las costas de la laguna por la acción del viento y, a medida que se elevan, alcanzan grandes distancias, dependiendo de la intensidad y persistencia del viento.

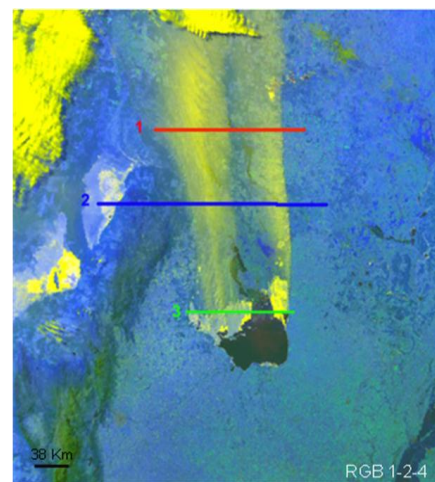


Figura 9. 29/07/2012. Imagen en falso color RGB 124.

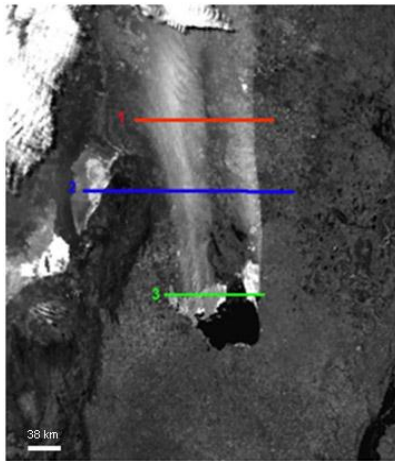


Figura 10. 29/07/2012. Imagen reflectiva (NIR B2)

En la Figura 11, se muestra la diferencia de las temperaturas (TB4-TB5), donde las dos plumas aparecen ahora en tonalidad oscura, por los valores negativos que toma esa diferencia.

A esta altura, es interesante hacer algunas observaciones comparando la imagen NIR (figura 10) con la imagen (TB4-TB5). En la imagen reflectiva (Figura 10) las nubes de agua y/o hielo y las superficies cubiertas de sal aparecen más brillantes que las plumas de sal, en tanto que en la imagen (TB4-TB5) las nubes siguen apareciendo brillantes pero las plumas de sal aparecen oscuras (Figura 11). Esto indica que la variable diferencia aporta información adicional para distinguir claramente los dos tipos de nube. El valor negativo de esta diferencia fue utilizado por [10] para detectar nubes de origen volcánico, usando un modelo de transferencia radiativa con las emisiones provenientes de una nube volcánica, y se encontró un efecto reverso en la absorción, con respecto a lo observado sobre nubes de agua y/o hielo, es decir que la emisión de radiación infrarroja en la ventana de los 10 μm a los 13 μm aumenta al crecer la longitud de onda [11]. Al trabajar con datos del sensor MODIS, se analizaron nubes de ceniza volcánicas y se encontró que son menos reflectivas que las nubes de agua y/o hielo, pero lo que las distingue claramente es el valor negativo

de la diferencia $TB(11\mu\text{m})-TB(B12\mu\text{m})$ y para los casos estudiados, estas diferencias alcanzaron valores extremos de -7 grados. Ese valor es de un orden mayor que los encontrados en el presente trabajo para las nubes de sal.

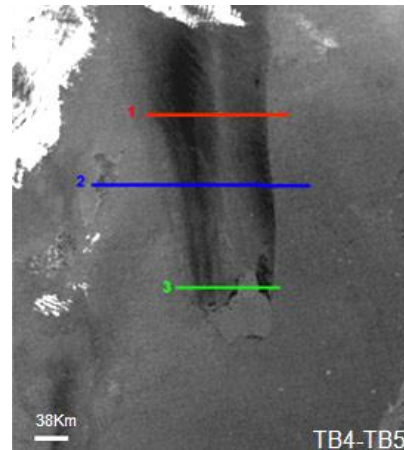


Figura 11. 29/07/2012. Imagen diferencia de temperatura (TB4-TB5).

Para ver en detalle los valores de las respuestas de las distintas variables sobre la nube de sal se determinaron las mismas a lo largo de tres transectas, que aparecen marcadas en las Figuras 9 a 11. Como se puede apreciar en las Figuras 12 y 13, las dos plumas de sal son claramente distinguibles por los dos máximos de reflectancia, que a su vez son coincidentes con los dos mínimos de valores negativos en la diferencia de temperatura ($TB4-TB5 = \Delta T$), a lo largo de la transecta 1. Sin embargo, si bien la reflectancia es máxima tanto en la pluma del oeste como en la del este, aunque esta última tiene una reflectancia algo menor, la diferencia entre las dos plumas es muy marcada en la diferencia de temperatura (Figura 13).

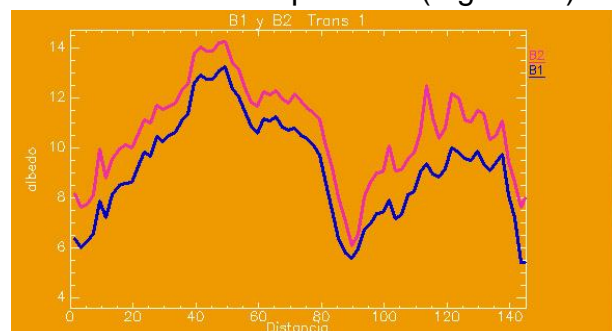


Figura 12. Variaciones de la reflectancia en las bandas 1 y 2, sobre la transecta 1 de la figuras 9 a 11.

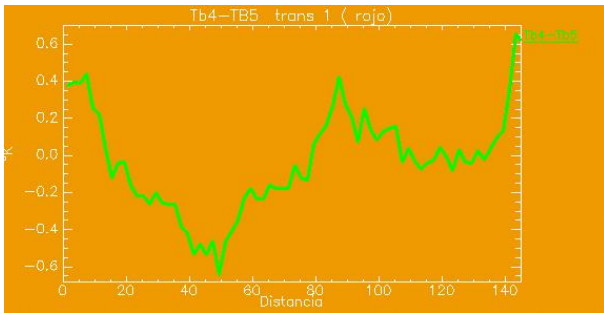


Figura 13. Ídem anterior pero para las variaciones de la diferencia de temperatura (TB4-TB5).

Como es observable en las imágenes anteriores, las dos plumas no son uniformes a lo largo de su trayectoria y un análisis sobre otras transectas, permite tener información sobre esas diferencias y obtener resultados de interés. Sobre la transecta 2 (Figura 14), el primer máximo registrado corresponde a la alta reflectividad de las salinas de Ambargasta, y los dos siguientes corresponden a las plumas de sal, notándose sobre esta transecta que la reflectividad desde ambas plumas es semejante, pero se invierte el comportamiento en la diferencia de temperatura, en tanto que sobre las salinas la diferencia (TB4-TB5) es positiva (Figura 15), o sea tiene en esta variable un comportamiento similar a las nubes.

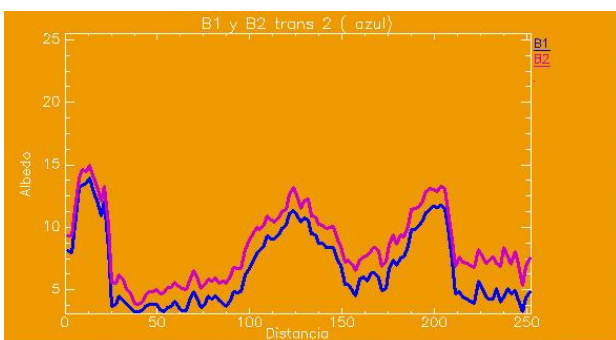


Figura 14. Variaciones de la reflectancia en las bandas 1 y 2, sobre la transecta 2 de la figuras 9 a 11.

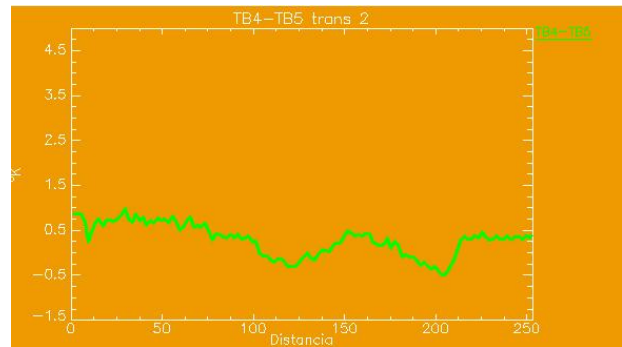


Figura 15. Ídem anterior pero para las variaciones de la diferencia de temperatura (TB4-TB5).

Sobre la transecta 3, (Figuras 16 y 17) las oscilaciones en los valores de reflectancia y de ΔT describen en general el comportamiento explicado sobre las transectas 1 y 2, pero hay una diferencia remarkable, que se observa en el sector donde la superficie está muy húmeda y posiblemente encharcada. Allí hay un mínimo general de los valores de reflectancia, llegando incluso a ser algo menor el de la banda NIR que el VIS, típico del comportamiento sobre este tipo de superficies o cubiertas del suelo.

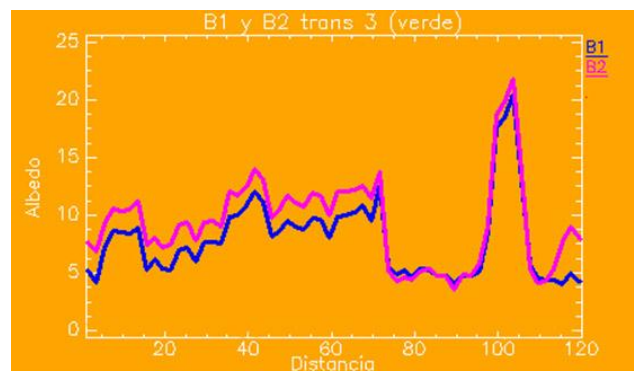


Figura 16. Variaciones de la reflectancia en las bandas 1 y 2, sobre la transecta 3 de la figuras 9 a 11.

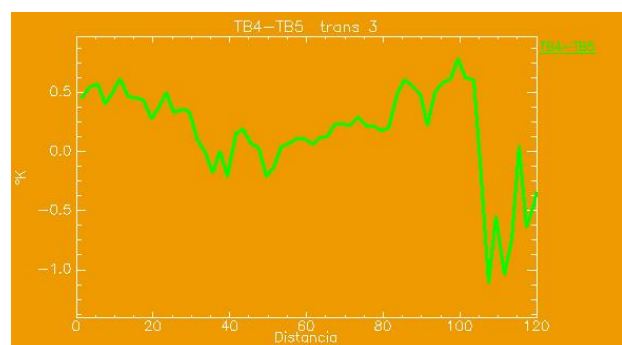


Figura 17. Ídem anterior pero para las variaciones de la diferencia de temperatura (TB4-TB5).

Nube de sal observada el 08/07/2012

En la Figura 18 se puede observar la imagen en falso color (RGB 124) y en la Figura 19 la B1 (VIS), para este evento observado a comienzos de julio de 2012. A diferencia del caso analizado anteriormente, estas nubes de sal se dan con condiciones de viento prevaleciente de dirección NNE. El análisis detallado en este caso se hace sobre una sola transecta, identificada con el número 4 en las Figuras 18 y 19. El comportamiento de las variables es semejante al caso anterior.

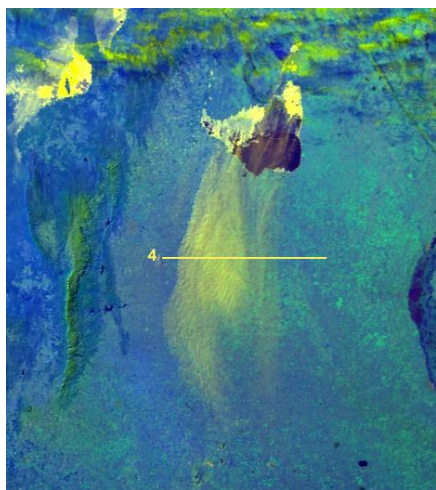


Figura 18. 08/07/2012, imagen en falso color (RGB 124).



Figura 19. Ídem anterior banda VIS.

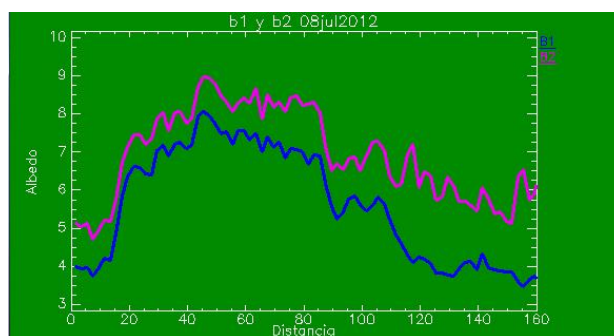


Figura 20. Variaciones de la reflectancia en las bandas 1 y 2, sobre la transecta 4 de las figuras 18 y 19.

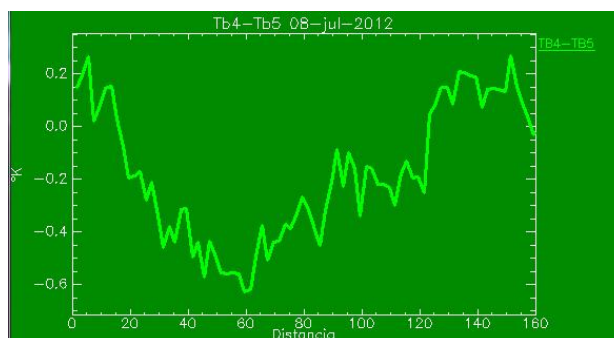


Figura 21. Ídem anterior pero para las variaciones de la diferencia de temperatura (TB4-TB5).

4.- CONCLUSIONES

Para este trabajo, el uso de imágenes MODIS y AVHRR permitió documentar la ocurrencia de nubes de sal en las proximidades de la Laguna de Mar Chiquita en la provincia de Córdoba, Argentina.

El análisis de las respuestas espectrales con datos AVHRR permitió diferenciar el comportamiento de estas nubes con respecto al de nubes de agua y/o hielo y con respec-

to a suelos de salinas. Si bien las nubes de sal estudiadas en este trabajo son mucho más reflectivas que el suelo, son menos reflectivas que las otras nubes y que las superficies salinas.

El valor de reflectancia depende del espesor de la nube, ya sean éstas de agua, hielo o sal. Pero las plumas puramente formadas por sal, se caracterizan por su forma y en general tienen menor reflectancia que las otras nubes. Su temperatura tampoco alcanza valores tan bajos como los que pueden tener los toques de nubes comunes, aún cuando sean de poco desarrollo vertical.

En algunos casos es posible observar la formación de nubes de agua en partes de las plumas, dependiendo del grado de humedad de la atmósfera y de la extensión de las plumas.

Un comportamiento destacable está relacionado con la diferencia de temperatura (ΔT : TB4-TB5). Este valor es negativo en presencia de nubes de sal, contrariamente a lo que se observa sobre las nubes de agua y/o hielo y las superficies salinas, constituyendo esta variable un índice adecuado para distinguir las nubes de sal de las otras. Es interesante destacar que los valores negativos de ΔT , también se observan en las plumas de origen volcánico, pero esas diferencias son de un orden de magnitud mayor; nunca se las observa en las nubes de agua o hielo.

Por otra parte, el poder identificar estas nubes con imágenes satelitales, permitirá establecer las condiciones de ocurrencia y su distribución espacio temporal, sobre lo cual hay muy poca información hasta el presente, no sólo a nivel nacional, sino también global.

El análisis de un mayor número de casos sería necesario para indagar sobre la relación entre los valores de la diferencia de temperatura (ΔT : TB4-TB5) y el espesor de la nube.

Queda pendiente ahora la tarea de observar si este fenómeno se produce en otra región del país y realizar un estudio estadístico y climatológico del mismo, para luego incluirlo en la codificación sinóptica.

REFERENCIAS

[1] Convenio de Ramsar - <http://www.ramsar.org>

[2] <http://www.promarmarchiquita.com.ar>

[3] ABUDUWAILI J., LIU D. W., WU G. Y. (2010). **Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions**. J. of Arid Land, Vol. 2 No. 2, 114-150.

[4] LENSKY I. M., ROSENFELD D., (2008). **Clouds-Aerosol-Precipitation Satllite Analysis Tool (CAPSAT)**. *Atoms. Chem. Phys.*, 8, 6739-6853.

[5] DI M., LU X., WANG P. **A dust-storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data**.

[6] MICKLIN P. (2008). **Using satellite remote sensing to study and monitor the Aral Sea and adjacent zone**. *Environmental Problems of Central Asia and their Economical,*

Social and Security Impacts. NATO Science for Peace and Security, Series-C: Environmental Security, 30-57.

[7] PRICE J. C. (1984). **Land surface temperature measurements from split window channels of the NOAA 7 advance very high resolution radiometer.** *J. Geophys. Res.* 89; 7231-7237.

[8] VELASCO I., GONIADZKI D., ALMEIRA G. (1997). **Monitoreo de ambientes lacustres con imágenes NOAA-AVHRR sobre territorio argentino.** *Anales de la 7ª Conferencia Internacional sobre Conservación y Gestión de Lagos. 1-4. San Martín de los Andes, Argentina.*

[9] VELASCO I., BOLZI S. C., RODRIGUEZ D., BURÉS A., MARINO M. (2011). **Detección, monitoreo y efectos producidos por partículas en la atmósfera durante 2009 sobre argentina con datos de sensores remotos.** *Anales CATE 2011.*

[10] PRATA A. J. (1989). **Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds.** *Geophysical Research Letters, Vol. 16, No. 11, 1293-1296.*

[11] BOLZI S. C., RODRÍGUEZ D., INÉS VELASCO I., MARINO M. (2012). **Detección y análisis espectral de partículas en la atmósfera utilizando sensores remotos.** *Presentación en el CONGREMET 2012. Manuscrito disponible por pedido a los autores del presente trabajo.*