

DETECCIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE NUBES DE SAL SOBRE ARGENTINA UTILIZANDO IMÁGENES NOAA-AVHRR

Silvana Carina Bolzi¹, Diana Rodriguez¹, Adriana Burés¹, Facundo Facio¹,
Mónica Marino¹, Inés Velasco
cariyjavy@yahoo.com.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional

RESUMEN

Las nubes o tormentas de sal sólo ocurren en lugares donde hay grandes depósitos de sal sobre el suelo, como los que rodean el Mar de Aral en Asia Central, el Gran Lago Salado en Utah (EEUU) y en nuestro país la Laguna de Mar Chiquita en Córdoba. Las tormentas de sal son nubes bajas formadas por partículas de sal cuyo desarrollo es similar a las tormentas de polvo, excepto por las características de los suelos donde se originan. En este trabajo se presenta una síntesis de la documentación preparada respecto a la ocurrencia de tormentas de sal en las cercanías de la Laguna de Mar Chiquita, a lo largo de varios años, desde el 2006 hasta el 2014. Las imágenes exploradas y archivadas, fueron tomadas por el sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA 17, 18 y 19. Para algunos casos particulares, además, se inspeccionaron y archivaron imágenes del sensor MODIS de los satélites TERRA y AQUA. Las imágenes revelan que estas tormentas se han producido en el transcurso del período examinado con distinto grado de desarrollo, desde plumas tenues hasta plumas densas y de gran extensión. Estas formas de expresarse están vinculadas a factores hídricos y meteorológicos. Como complemento de las imágenes, se revisaron los registros de las condiciones meteorológicas que acompañaron a los distintos eventos y que complementan la base de datos espectrales, permitiendo así obtener un archivo valioso para encarar futuros estudios interdisciplinarios. A modo de ejemplo se muestran algunos casos, uno para nubes intensas que se extienden hacia el sur, otro donde por el contrario la nube se esparce hacia el norte de la laguna por varios cientos de kilómetros, otro de una nube débil y un último caso con nubes de sal y humo.

Palabras clave: Tormentas de sal, nubes de sal, NOAA-AVHRR, Laguna Mar Chiquita.

ABSTRACT

Salt clouds or salt storms only happen in places where there are large deposits of salt on the ground, like those around the Aral Sea in Central Asia, the Great Salt Lake in Utah (USA) and in our country the Laguna Mar Chiquita in Córdoba. These storms are low clouds whose development is similar to dust storms, except for the characteristics of the soil where they originate. In this paper the occurrence of salt storms near the Laguna Mar Chiquita over several years is documented from 2006 to 2014, mainly using NOAA-AVHRR images and for a few cases MODIS images. The images reveal that these storms have occurred with different development degrees, from a weak plume to a cloud of great extent. These forms of expression are linked to hydrological and meteorological factors. These clouds are seen mainly in the winter months and their frequency varies greatly from year to year. In addition to the images, records of weather conditions that accompanied the various events and complement the basis of spectral data were explored and archived, allowing face future interdisciplinary studies. As examples, some cases are showed, one for heavy clouds which extend southward, other where the cloud is spreading to the north of the lagoon for several hundred kilometers, another showing a thin cloud and the last case with salt clouds and clouds originated on fires.

Key words: Salt storms, salt clouds, NOAA-AVHRR, Mar Chiquita Lake

1) INTRODUCCIÓN

Las tormentas de polvo y arena son un fenómeno meteorológico, cuya definición tiene algunas variantes según distintos organismos de consulta como la World Meteorological Organization (WMO), 306 y 407 y la American Meteorological Society (Maynard and Boase, 2010). Sin embargo, estas instituciones, que lideran la definición e inclusión de los distintos fenómenos meteorológicos en los reportes correspondientes, no han incluido a las tormentas y/o nubes de sal como un fenómeno diferente de las tormentas de polvo o arena. Aun así, estas aparecen referidas como tal por algunos autores como Goudie y Middleton 2006 y Abuduwaili et al., 2010.

El estudio de las tormentas de polvo en general (sean de polvo, arena o sal) ha tenido un creciente desarrollo en los últimos años, dado que tienen un alto impacto en el sistema terrestre, al introducir grandes cantidades de aerosol mineral en la atmósfera, que puede tener implicancia tanto en términos de cambio climático, como en los ciclos biogeoquímicos. Además, por las grandes distancias a las que es transportado el polvo, estas tormentas impactan en zonas que pueden estar muy alejadas de la fuente. Es importante entonces saber de dónde viene el polvo y hacia dónde va. Es decir, por una parte, identificar las regiones fuente y su origen, para conocer las características del polvo y determinar si es necesario establecer políticas de monitoreo y manejo, ya que pueden tener un fuerte impacto en los seres humanos, en los recursos naturales y en distintas infraestructuras. Por otro lado, es necesario predecir el desplazamiento del polvo lejos de su fuente de origen mediante modelos adecuados que contemplen las distintas escalas de interacción. También es necesario establecer la frecuencia e intensidad de estas tormentas y las causas de su variabilidad. En algunas regiones del mundo hay evidencias de la reducción del impacto que pueden producir las tormentas de polvo mediante adecuadas políticas sobre el manejo del suelo, mientras que en otras, el secado de lagos y la tala indiscriminada de bosques, entre otros procesos, han conducido a un aumento de la ocurrencia de las tormentas de polvo (Goudie, 2009).

El Departamento de Teledetección y Aplicaciones Ambientales (TAA), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), desde 1995, recibe, procesa y archiva regularmente las imágenes NOAA AVHRR. En este Departamento, además, se analizan las imágenes para generar distintos productos, como índices de vegetación (NDVI), índices de humedad (NDWI) y otros que pueden ser requeridos desde distintas áreas del SMN o desde otras instituciones nacionales o extranjeras. A partir del año 2006, llamó la atención la aparición de nubes de polvo muy blancas, con forma de pluma y de variada intensidad y extensión en las proximidades de la laguna de Mar Chiquita (Córdoba). La presencia de ese tipo de nubes a partir del 2006 como un fenómeno nuevo, también es mencionado por Botella Cereceda (2010) en su análisis de los ciclos hidrometeorológicos en el sistema Mar Chiquita.

En julio de 2006 la NASA también publicaba una imagen MODIS, la primera de una serie, donde se podía ver un evento de estas características, <http://earthobservatory.nasa.gov>. Así, se inició el análisis y seguimiento de estas nubes en forma sistemática en el Departamento TAA. Con el transcurso de los años y según una simple apreciación visual de las imágenes reflectivas o en falso color, se observó que estas nubes en general translúcidas, adquirían en ocasiones características de nubes más espesas y opacas. Esto dio lugar a una primera separación de nubes de polvo salino en tenues o débiles y espesas o intensas, pudiendo considerarse las segundas como verdaderas tormentas de sal. Con el transcurrir del tiempo se observó que estos eventos se repetían y en algunos casos por su intensidad e impacto en el ambiente eran noticia en los medios periodísticos, constituyendo un tema que también fue abordado por instituciones dedicadas al estudio del medio ambiente (Botella Cereceda, 2010; Plencovich, 2013). Algunos de los casos categorizados como densos o intensos, ya fueron analizados en base a sus respuestas espectrales y a las condiciones meteorológicas en las que se formaron (Velasco et al., 2011; Bolzi et al., 2012; Rodríguez et al., 2013).

Lo expuesto hasta aquí, motivó la revisión de todas las imágenes NOAA-AVHRR recibidas y archivadas en el Departamento de TAA entre los años 2006 y 2014, y la formación de un archivo de imágenes que documenta los fenómenos mencionados, conjuntamente con registros de datos meteorológicos de las estaciones cercanas. En este trabajo se presenta una síntesis de un primer análisis de la información del archivo, el que constituye una base de datos importante para aquellos investigadores interesados en abordar el estudio de las tormentas de polvo y su impacto.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

La región donde se generan las plumas de sal que se documentan, pertenece al sistema endorreico Laguna Mar Chiquita - Bañados del Río Dulce, conformado por el mayor lago salado de América Latina y por uno de los humedales más extensos del mundo (Figura 1). Por su gran biodiversidad y variedad de paisajes (extensa superficie permanente de agua, humedales y pastizales) este sistema ha sido incorporado a partir de 2002 a los "Sitios Ramsar" creados por la Convención de Ramsar en pro de la conservación y uso racional de humedales y sus recursos (Plencovich, 2013). Este sistema de bañados y lagunas está caracterizado por una compleja red de drenaje y por su sensibilidad a las variaciones de nivel y a los fenómenos meteorológicos (Bucher et al., 2006).

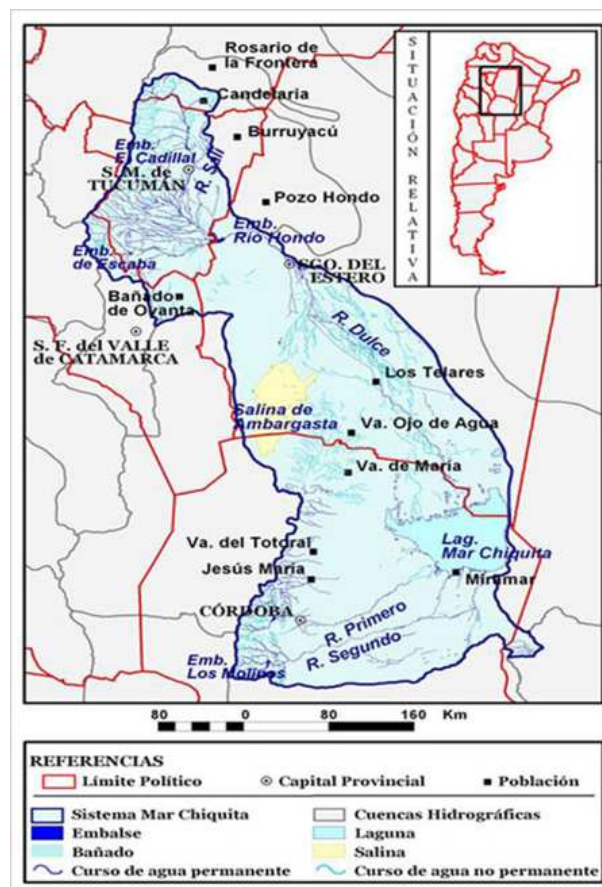


Figura 1: Mapa de la cuenca Sali-Dulce, fuente: <http://www.cuencasalidulce.gov.ar>

El manejo hídrico de la cuenca está regido por un único acuerdo, referente a la regulación del Río Dulce, que está en vigencia desde el año 1967, el cual fue firmado entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. Este acuerdo faculta a las provincias de Tucumán y Santiago del Estero

a retener volúmenes de agua significativos. Esto implica que si estas provincias derivaran el máximo caudal acordado, Tucumán tendría derecho a retener hasta un 32% del volumen, y Santiago del Estero debería dejar escurrir, hacia aguas abajo, un 22% de lo recibido (descontando pérdidas naturales). Aunque el acuerdo no es claro y deja lugar a distintas interpretaciones, en principio podría estimarse que el Río Dulce al entrar en la provincia de Córdoba aportaría menos de un 15% del volumen original derivado desde Tucumán (Plencovich, 2013). Así, el aporte de agua hacia la laguna, es afectado en parte por el manejo hídrico, más allá de las condiciones meteorológicas que pueden ser el otro factor importante. En los últimos diez años aproximadamente, la Laguna ha presentado un marcado descenso de su nivel con un consecuentemente aumento de las playas en su entorno, principalmente en el sector norte y se han observado fenómenos atípicos que favorecieron la formación de tormentas de sal y polvo desde la costa Norte de la Laguna Mar Chiquita, alcanzando en algunos casos a afectar más de 150 km de longitud (Botella Cereceda, 2010). Estos hechos, advertidos por la comunidad científica, fueron además, publicados en periódicos locales de alto alcance en la comunidad cordobesa. Uno de estos artículos difundido el día martes 7 de Julio de 2009, resaltaba dicha bajante y advertía sobre el manejo de los acueductos que restan agua al sistema, reclamando a las autoridades de la Provincia que tomen medidas paliativas (Colautti, 2009).

El descenso en el nivel de agua de la laguna, que dejó expuestas grandes playas de sal está ilustrado en la Figura 2 con imágenes recibidas y procesadas en el Dpto. de TAA. Esas playas al ser barridas por los vientos, dieron origen a la formación de las plumas de sal, que se registran en una base de datos.

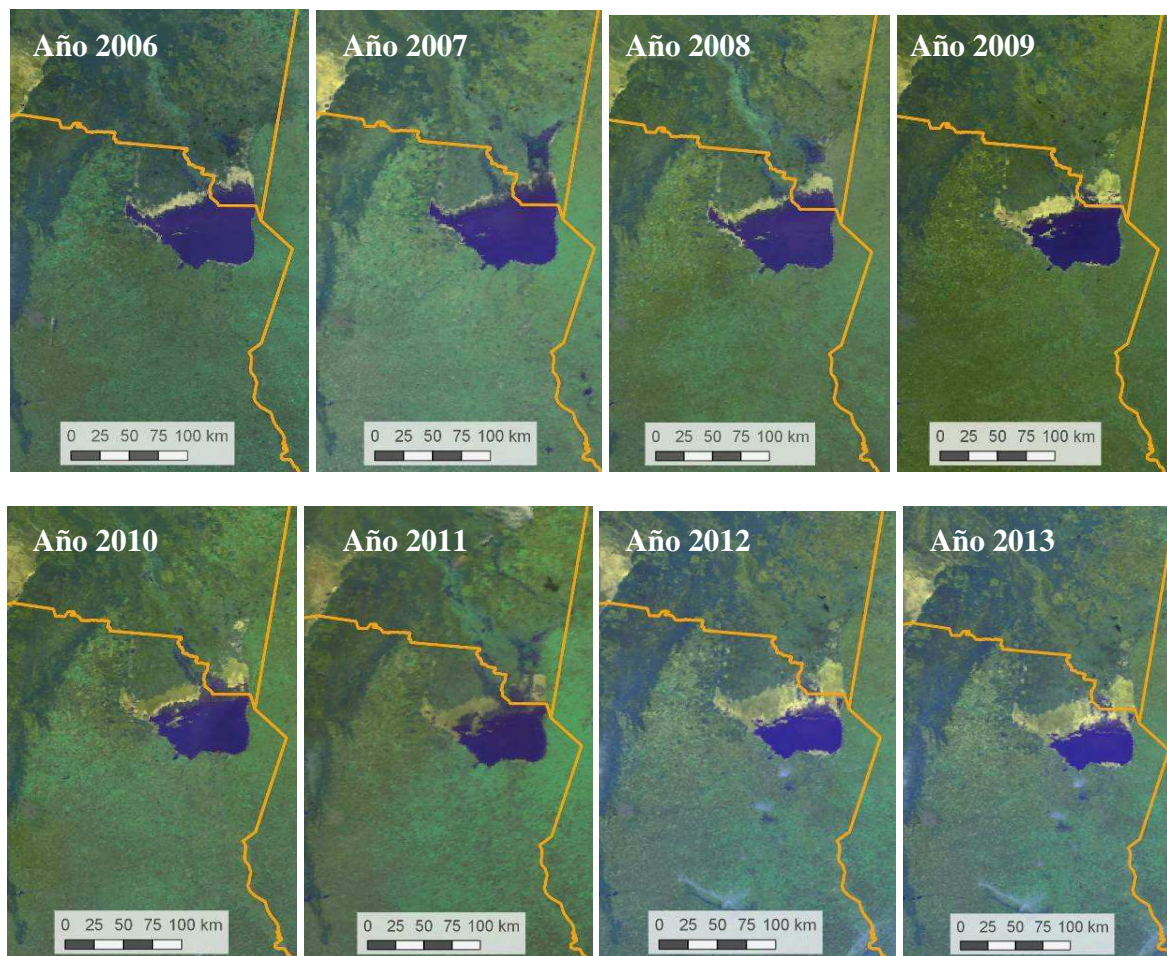


Figura 2: Secuencia comparativa del cauce de la Laguna Mar Chiquita 2006-2013, imágenes falso color (R G B-VIS NIR IR).

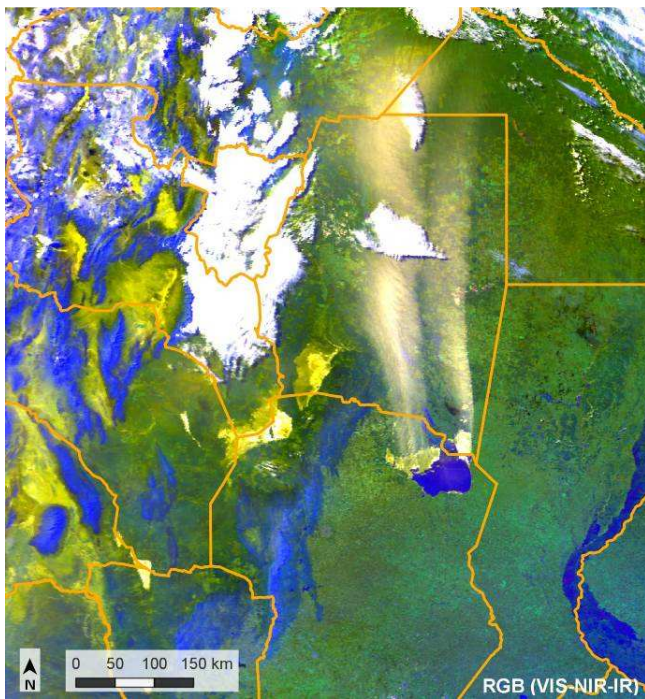
Para el presente trabajo se revisó el periodo abarcado entre 2006-2014 y procesaron 279 imágenes obtenidas por los satélites NOAA 16, 17, 18 y 19, pasadas matutinas y vespertinas, recibidas en el Departamento de TAA, del Servicio Meteorológico Nacional, en las cuales se observó la presencia nubes de sal. Todas las imágenes fueron calibradas y convertidas a reflectancias (ρ) las bandas reflectivas 1 (0,58-0,68 μ m) y 2 (0,72-1,1 μ m), y a temperaturas de brillo (TB), las bandas infrarrojas 4 (10,3-11,3 μ m) y 5 (11,5-12,5 μ m). Con las bandas infrarrojas, además se calculó la diferencia de temperatura (TB4-TB5). Posteriormente, las imágenes fueron georreferenciadas usando la proyección latitud-longitud, dato WGS-84.

La primera exploración de las imágenes se realizó mediante una inspección visual de imágenes en falso color compuesto (RGB-124), en las que las plumas de sal pueden aparecer en color blanquecino o amarillento, dependiendo esto de la temperatura. Las plumas se detectaron siempre en las cercanías de la laguna de Mar Chiquita. A partir de su identificación en las imágenes RGB, se procedió a formar un archivo constituido exclusivamente por estas imágenes. Posteriormente, por una simple evaluación visual, cada pluma fue categorizada como pluma de nube de sal débil (tenue) o intensas (espesas). Las plumas que se clasificaron como débiles, son translucidas en las imágenes de la banda visible, y no se distinguen en la imagen de diferencia de temperatura (TB4-TB5). Por otra parte las intensas son espesas y muestran una clara señal en todas las bandas del sensor y en la imagen diferencia. En los casos de plumas espesas y extendidas se revisaron los datos de las estaciones meteorológicas que podrían estar afectadas para ver cómo se informaban estos eventos. Para algunos casos también se obtuvieron imágenes del sensor MODIS (TERRA y AQUA). Toda esta información fue volcada en una base de datos, ordenados cronológicamente para facilitar su identificación. La Tabla I es un ejemplo de los campos de la base de datos generada. Cada encabezamiento es por sí aclaratorio, pero en el caso de “Datos de Estaciones” se refiere exclusivamente a la red de estaciones meteorológicas de superficie del SMN y en el caso que la nube de sal pasara por alguna de ellas en la planilla figura el dato registrado de tiempo presente de dicha estación. Esta información se solicitó y obtuvo del Banco de Datos del SMN. Las planillas correspondientes se incorporaron a esta base de datos. En cuanto a los “Comentarios”, se refiere a todo aquello que agiliza el reprocesamiento de algún evento, estos incluyen datos relevantes, por ejemplo, de visualización de la nube, si había otro tipo de fenómeno presente como humo o ceniza volcánica datos sobre la imagen satelital, tales como calidad, nubosidad y pasada del satélite respecto al cenit de la laguna.

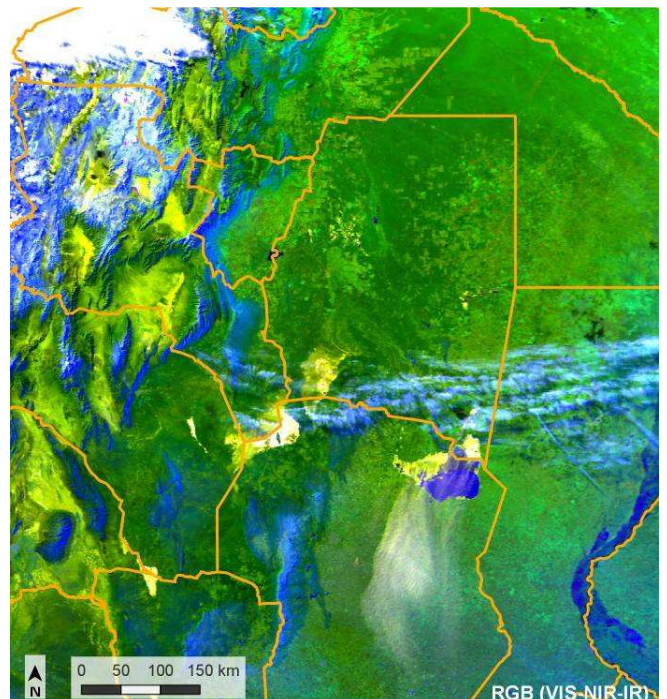
Tabla I. Campos de la base de datos

Año	Día Juliano	Fecha completa	Hora UTC	Satélite Sensor	Dirección viento	Intensidad pluma	Datos de Estaciones	Comentarios
-----	-------------	----------------	----------	-----------------	------------------	------------------	---------------------	-------------

Las nubes más intensas y además, más extensas, pueden ser calificadas como tormentas de sal o de polvo salino. Las plumas en general se extienden a partir de su punto de origen (fuente), con dirección principalmente hacia el norte o hacia el sur, definida ésta por la dirección del viento prevalente. En las Figuras 3a) y 3b), se presentan dos ejemplos de tormentas de sal observadas durante el año 2012. En particular, la pluma de sal del 29 de julio de 2012 se extendió hacia el norte unos 650 km, llegando hasta el sur de la provincia de Salta. En la Figura 4a) se presenta un ejemplo que corresponde a un caso nube de sal débil. Esta pluma de sal tiene poca extensión, es muy translucida y se destaca sólo en la banda visible.

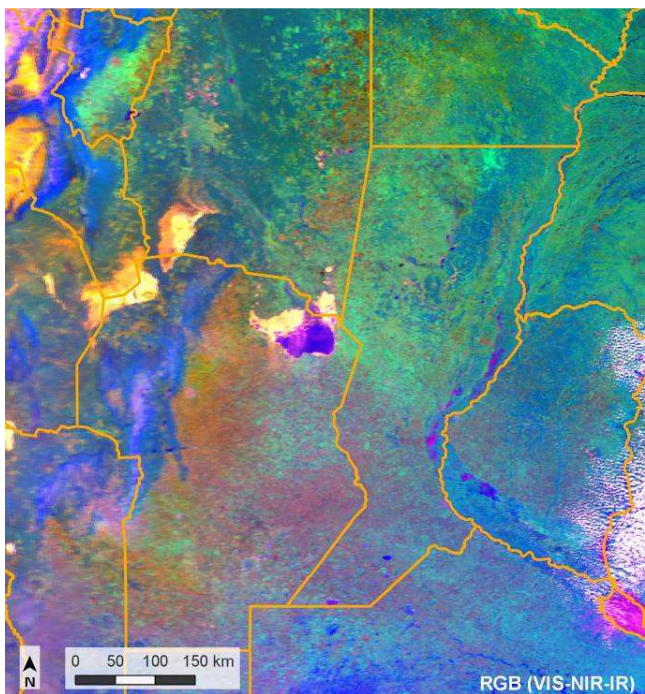


a) 29/07/2012 19:01 UTC

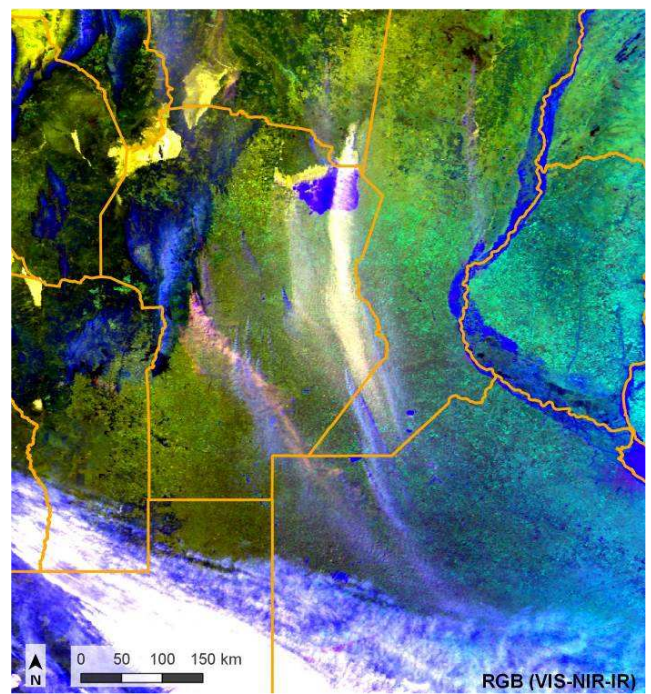


b) 08/09/2012 19:30 UTC

Figura 3: Ejemplos de tormentas de sal, a) con viento sur, b) con viento norte. Ambas imágenes fueron capturadas por el sensor AVHRR NOAA-18.



a)



b)

Figura 4: a) Ejemplo de plumas débiles 05/06/2012, 17:20 UTC, NOAA-19. b) Ejemplo de plumas de sal con distinta intensidad originadas en el entorno de la laguna y de humo originadas al oeste de la provincia de Córdoba, 29/08/2009, 18:21 UTC, NOAA-19.

Dado que en general, estos eventos de nubes de sal se dan en condiciones meteorológicas en las que prevalecen la humedad baja y los vientos fuertes, simultáneamente con las nubes de sal se observaron casos con presencia de plumas de humo. Sin embargo, son claramente separables unas de otras, por sus diferentes respuestas espectrales. En la Figura 4b) se muestra una imagen donde se registran ambos tipos de plumas. Las nubes de sal aparecen con tonalidad blanca, mientras que las nubes de humo generadas en focos de incendios al sudoeste de la Laguna, dependiendo de la intensidad del incendio, si bien adquieren un aspecto de pluma, su respuesta espectral es más compleja y variada dependiendo fuertemente de las características del foco de calor o fuego o el tipo de incendio.

3) RESULTADOS

Los resultados que se documentan corresponden al número de días con presencia de nube de sal. Para poder determinar el tiempo que duró cada una, sería necesario recurrir a imágenes de satélites geoestacionarios. No obstante, aún con las imágenes NOAA se observa la presencia de algunas plumas en días consecutivos e incluso hay ejemplos donde la dirección cambia de norte a sur y viceversa.

La revisión de las fechas de ocurrencia permitió ver que el número de días en los que se observan plumas de sal, varía de año a año y que se dan exclusivamente con prevalencia de vientos del norte o del sur, y pueden ser tenues o densas con una u otra dirección del viento (Figura 5). Por otra parte, se observó que la mayor frecuencia de plumas densas o tormentas se produjo entre los meses de julio a septiembre (Figura 6), con una prevalencia de estos eventos en condiciones de viento norte, al igual que en el caso de plumas débiles (Figura 7). Este comportamiento requiere un mayor análisis para emitir conclusiones. Ente los años 2006 y 2008, sólo se observaron plumas débiles. En el 2007 coincidiendo con un estado de la laguna con nivel alto de agua sólo se registró una, y en el año 2008 hubo un leve aumento del número de días con pluma de sal. En el año 2009 se produjeron cambios importantes, el número de días con nubes de sal aumentó notoriamente y comenzaron a observarse aquellos eventos que fueron calificados como intensos, coincidentes con un año de poca humedad y con el cuerpo de agua de la laguna más retraído. La mayor frecuencia de plumas de sal intensas se produjo en los años 2009 y 2013. En el año 2009 se registraron 29 días con presencia de nubes de sal y en el año 2013, 44 días. En esos dos años en particular, la extensión del cuerpo de agua tuvo fluctuaciones, lo que condujo a un mayor depósito de sal sobre la costa al retirarse el agua, lo que explicaría en parte el record de registros de casos.

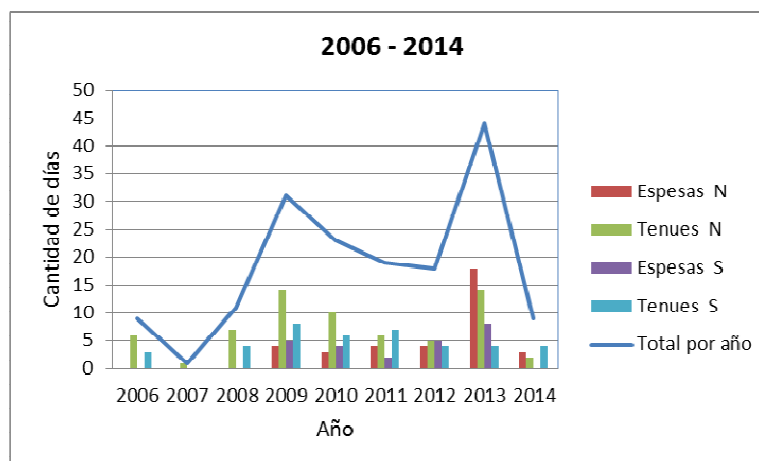


Figura 5: Variación anual el número de días con pluma de sal. N y S indican la dirección prevalente del viento.

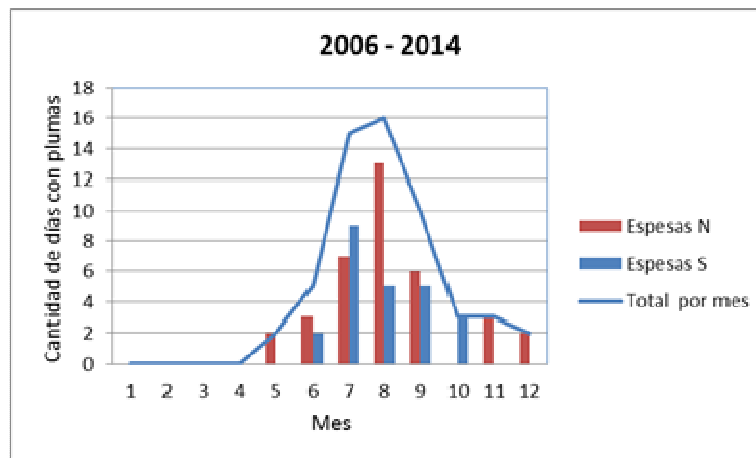


Figura 6: Variación mensual del número de días con plumas espesas entre los años 2006-2014

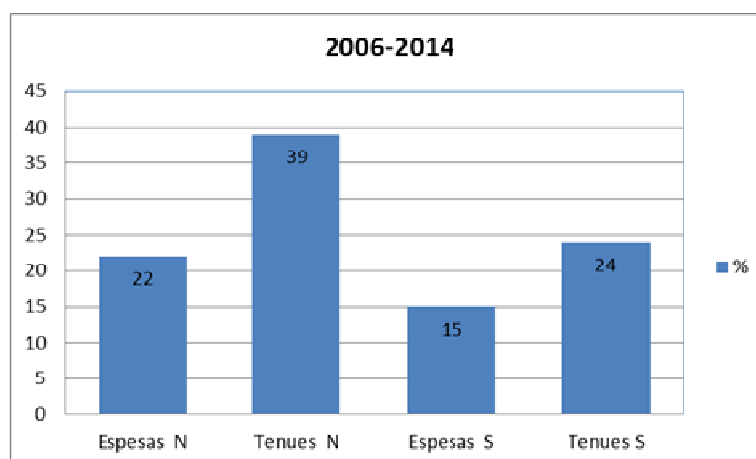


Figura 7: Frecuencia de nubes de sal espesas y tenues según la dirección del viento prevalente.

A lo largo del año, también se observan variaciones, notándose una mayor frecuencia en los meses de invierno y prácticamente ningún evento en verano. Este comportamiento, desde el punto de vista meteorológico puede deberse en parte a un mayor pasaje de sistemas frontales, pero debería considerarse también el régimen de precipitación prevalente y circulaciones y/o efectos atmosféricos de menor escala. Esto amerita otro análisis.

A veces, hay días consecutivos en los que se observaron plumas de sal, pudiendo o no variar tanto su intensidad como su dirección. Además, cada pluma puede haber sido registrada por más de un satélite en la misma fecha, así, para algunos eventos se cuenta con más de una imagen NOAA-AVHRR. Para un número mucho menor de casos también se dispone de imágenes del sensor MODIS. Para todo el periodo se recopilaron los datos observados por las estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del SMN, que se estimó fueron afectadas por estos eventos.

4) CONCLUSIONES

El presente trabajo acredita y documenta un fenómeno meteorológico que puede denominarse nube y/o tormenta de sal, que ha sido observado en Argentina desde el año 2006. Estos eventos se originaron exclusivamente en las cercanías de la laguna de Mar Chiquita (Córdoba), desde las playas que quedan descubiertas al descender el nivel de agua de la laguna y cuando el viento de regular intensidad las barre, levantando sal e introduciéndola en la atmósfera. Luego, dependiendo de la circulación del aire, la sal puede ser trasladada a grandes distancias y depositada muy lejos de su región de origen. En algunos de los casos registrados, las plumas de sal se extendieron hacia el norte o hacia el sur por más de 400 km coincidiendo con el pasaje de sistemas frontales. El número de eventos varía de un año a otro, dependiendo de factores meteorológicos e hidrológicos. A su vez también varían a lo largo del año, observándose la mayor frecuencia de casos en los meses de invierno y una ausencia casi total en el verano.

Dado el impacto que estos fenómenos tienen en el medio ambiente, este trabajo es un punto de partida para avanzar en la investigación de estos eventos con diversos enfoques.

AGRADECIMIENTOS: A Irene Barnatan, "Jefa del Banco de datos- SMN", por facilitar los datos horarios de las estaciones para el período de estudio.

REFERENCIAS

Abuduwaili, J., LIU, DongWei, WU, GuangYang 2010: Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions. *Journal of Arid Land*, 2010, VOL. 2, NO. 2, 144–150.

Bolzi, S. C., Rodríguez, D., Velasco I., Marino M. 2012: Detección y análisis espectral de partículas en la atmósfera utilizando sensores remotos. XI Congreso Argentino de Meteorología, Congremet XI. 12 págs. Solicitar copia al primer autor cbolzi@smn.gov.ar.

Botella Cereceda, A., 2010: Propuesta de volúmenes ambientales para el sistema Laguna de Mar Chiquita Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Técnica, Forestal de la Escuela Politécnica Superior de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia, realizado en el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). (Consultada el 08.10.14).

Bucher, E.H., Gavier Pizarro, G. & Curto E. D., 2006: Síntesis geográfica. En: Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina) (ed. Bucher E.H.), pp. 15-27. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina).

Colautti, F., 2009: Diario La Voz del Interior, de nuestra Redacción, http://archivo.lavoz.com.ar/nota.asp?nota_id=531879.

Goudie, A. S. and Middleton, N. J. 2006: Desert Dust in the Global System. Springer Science & Business Media, 298 pages.

Goudie, A. S., 2009: Dust storms: Recent developments. *Journal of Environmental Management* 90, 89–94.

Maynard, B. and Boase B., 2010: Reporting of duststorms and sandstorms. AMOFSG/8-SN No. 40.

NASA 2006: Image by Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team at NASA Goddard Space Flight Center <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=17101&src=ve>. (Consultada 03.03.15)

Plencovich, G. E., 2013; Simulación hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba – F.C.E.F. Y N. <http://www.efn.uncor.edu/posgrado/rrhh/asignaturaspdf/Tesis/Plencovich.pdf> (Consultada 27.10.14)

Rodríguez D., Bolzi S. C., Velasco I., Marino M. 2013: Análisis espectral de nubes de sal originadas en las cercanías de la laguna de Mar Chiquita utilizando sensores remotos. Anales del VII Congreso Argentino de Tecnología Espacial. En CD. 10 págs.

Velasco, I. Bolzi, S. C., Rodríguez 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. Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Solicitar copia al coautor cbolzi@smn.gov.ar.