

CONOCIMIENTO CLIMÁTICO
Y REDES DE DATOS METEOROLÓGICOS

**¿POR QUÉ
NECESITAMOS
MONITOREAR
EL CLIMA?**



FRANCISCA MUÑOZ

Encargada de Datos y Cómputos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 de la Universidad de Chile. MSc en Ciencias de la Computación de VUB (Vrije Universiteit Brussel), Bélgica; Ingeniera Civil en Computación, Universidad de Chile.

fmunoz@dgf.uchile.cl

ESTE ARTÍCULO FUE ELABORADO CON LOS APORTE CIENTÍFICOS DE LA DIRECTORA DEL (CR)2 LAURA GALLARDO, LOS INVESTIGADORES (CR)2 JUAN PABLO BOISIER Y ROBERTO RONDANELLI, Y LA REVISIÓN EDITORIAL DE LUZ FARIÑA.

El tiempo y el clima afectan la forma en que vivimos y las decisiones que tomamos. La disponibilidad hídrica, actividades económicas, interacciones sociales, migraciones, planificación e implementación de políticas públicas a diferentes escalas, e incluso la biodiversidad del planeta se relacionan con las tendencias climáticas o con la recurrencia de eventos extremos y los escenarios futuros.

A nivel global, eventos meteorológicos extremos tales como sequías, tormentas de viento, olas de calor, inundaciones fluviales y costeras han aumentado considerablemente en las últimas décadas (ver Jennings 2011), y las proyecciones climáticas (IPCC, 2014) muestran que estos serán más frecuentes y severos.

En nuestro país, por ejemplo, la sequía extrema y los aumentos de temperatura que hemos experimentado en los últimos seis años no tienen precedentes en el registro histórico. Esta condición se presenta en siete regiones con un déficit de precipitaciones cercano al 30% y en el contexto de la década más seca y cálida de los últimos 100 años (Figuras 1 y 2).

“En gran parte esta tendencia responde a variaciones naturales: cambios de fase en El Niño (ENSO) y en la Oscilación Decadal del Pacífico. Pero es muy poco probable que los cambios observados tengan un origen exclusivamente natural. Simula-

ciones con modelos de clima –que reproducen la tendencia de precipitación negativa en Chile central– muestran que en el caso de la megasequía, el factor antrópico explicaría cerca del 25% del déficit observado entre 2010 y 2014” señala el estudio “La Megasequía 2010-2015: una lección para el futuro” elaborado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, formado por científicos de la Universidad de Chile, Austral y De Concepción (para más detalles, ver Boisier et al 2015).

Pero, ¿cómo podemos realizar predicciones a largo plazo y así determinar la eventual recurrencia de algún evento, diferenciando la contribución antropogénica de la variabilidad natural? Sólo es posible si contamos con datos observados de larga data, robustos y confiables que sirvan de entrada a los modelos climáticos.

En tanto, para predecir y generar alertas tempranas de eventos extremos –como aluviones, incendios forestales derivados de olas de calor, o tormentas inusuales– es también necesario contar con redes automáticas de monitoreo que recolecten, procesen y modelen estas observaciones en tiempo real.

“El monitoreo climático es la observación del comportamiento de la atmósfera y del océano. No obstante, se puede monitorear también la interacción con otros componentes del sistema climático que hacen las simulaciones más complejas y costosas en recursos de cómputos, como por ejemplo el suelo, las masas de hielo, las emisiones químicas o la vegetación”.

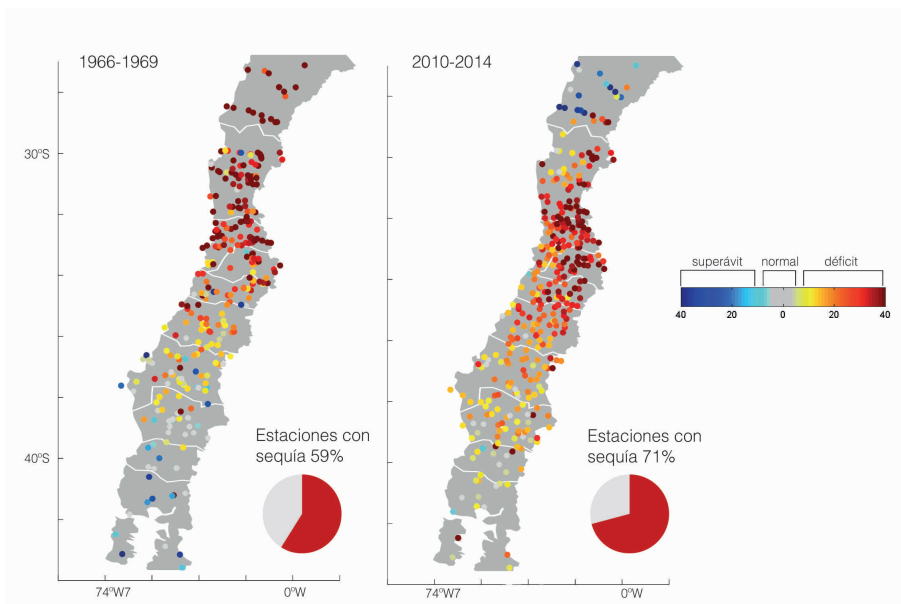


FIGURA 1. DÉFICIT O SUPERÁVIT PLUVIOMÉTRICO PARA LOS PERÍODOS 1966-1969 Y 2010-2014. EL DÉFICIT, EXPRESADO EN PORCENTAJE, SE CALCULA EN CADA ESTACIÓN COMO EL TOTAL ANUAL PROMEDIO DEL PERÍODO SECO DIVIDIDO POR EL PROMEDIO DE LARGO PLAZO (1970-2000).

FUENTE: LA MEGASEQUÍA 2010-2015: UNA LECCIÓN PARA EL FUTURO* ELABORADO POR (CR)2.

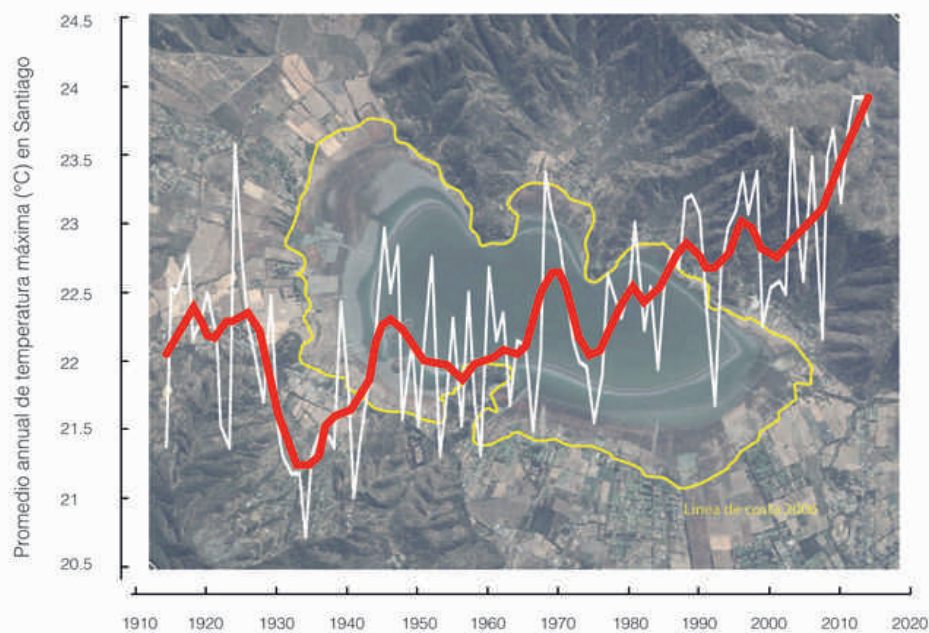


FIGURA 2. LÍNEA BLANCA: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LA ESTACIÓN QUINTA NORMAL (SANTIAGO) ENTRE 1914 Y 2014. CURVA ROJA: PROMEDIO MÓVIL DE TRES AÑOS. IMAGEN DE FONDO (GOOGLE EARTH TM) MUESTRA LA CONDICIÓN DE LA LAGUNA DE ACULEO EN ABRIL DE 2015 Y LA LÍNEA DE COSTA EN ABRIL DE 2016, ENFATIZANDO LA REDUCCIÓN DE SU ESPEJO DE AGUA.

FUENTE: "LA MEGASEQUÍA 2010-2015: UNA LECCIÓN PARA EL FUTURO" ELABORADO POR (CR)2.

EL NACIMIENTO DE LAS REDES DE MONITOREO CLIMÁTICO

Haciendo un poco de historia, tempranamente los observadores de los fenómenos naturales se dieron cuenta de que las tormentas se movían por la tierra, y podían llegar a afectar regiones distantes entre sí. Esto aumentó el interés de los meteorólogos por contar con observaciones de zonas o países vecinos. Pero no fue hasta fines de 1840 cuando la invención del telégrafo permitió el intercambio en tiempo real de las observaciones relacionadas con temperatura, viento, precipitación o nubes, entre regiones de Estados Unidos o países de Europa.

El principal interés fue la advertencia temprana de tormentas. En este mismo proceso, para que los datos fueran comparables entre sí y poder usarlos en análisis sinópticos, se decidió determinar horas fijas y simultáneas para realizar las observaciones. Definieron también una codificación y vocabulario estándar y un manejo consistente de los instrumentos (Figura 3).

En 1800 los meteorólogos ya comprendían algunos principios generales de movimientos atmosféricos de gran escala. El análisis de colecciones de datos históricos de distintas partes del globo, permitió comprobar relaciones entre temperatura y latitud, variaciones de las temperaturas promedio en distintas épocas del año y hemisferios. Se calcularon también anomalías* de temperatura global, con datos de 280 estaciones, para un período de referencia de 1736 a 1885, lo cual fue una hazaña extraordinaria para la época.

"Hasta el día de hoy, contar con la mayor cantidad de estaciones, y con largas series de tiempo, constituye un bien muypreciado en muchos ámbitos de la ciencia, que ayuda a entender mejor el sistema climático y sus fenómenos".

* VER GLOSARIO EN PÁGINA 41.

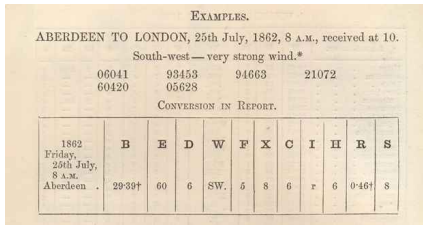


FIGURA 3.
TELEGRAMA CON ENVÍO DE DATOS METEOROLÓGICOS. LAS SIGLAS SIGNIFICAN:

- B - BAROMETER
- E - EXPOSED THERMOMETER IN SHADE
- D - DIFFERENCE OF WET BULB
- W - WIND DIRECTION
- F - FORCE (ON ADMIRAL BEAUFORT'S SCALE)
- X - EXTREME FORCE SINCE LAST REPORT
- C - CLOUD (1-9)
- I - TYPE OF WEATHER (B - BLUE SKY; R - RAIN ETC)
- H - HOURS OF RAINFALL
- S - SEA DISTURBANCE

FUENTE: BBC.

La red mundial de datos meteorológicos, es presumiblemente uno de los sistemas más antiguos para producir información globalizada, en el sentido de que transmite información alrededor del mundo, para crear información sobre el mundo como un todo. Inicialmente se desarrolló de forma local en servicios meteorológicos o hidrológicos nacionales, pero ya en 1873 se decidió crear la "Organización Meteorológica Internacional", que se reunía regularmente para elaborar normas comunes sobre distintos aspectos de la actividad meteorológica. En 1946, en el marco de la creación de la Organización de Naciones Unidas, fue reemplazada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) organismo que hasta el día de hoy coordina y apoya a los Estados o territorios miembros, en el manejo de observaciones, comunicación de datos meteorológicos, entre otros.

OBSERVACIONES DE LA ALTA ATMÓSFERA

Sin embargo, persistía la necesidad de observar las capas más altas de la atmósfera. Inicialmente se utilizaban globos y cometas con barómetros

y termómetros afirmados a ellos, que alcanzaban sólo unos pocos kilómetros de altura. A inicios de 1930, con los avances tecnológicos en telecomunicaciones, se agregó un sistema de transmisión de radio a los instrumentos meteorológicos, llamados radiosondas*, que lograban registrar mediciones hasta la estratósfera (aproximadamente a 30 kilómetros de altura). La utilidad de estos datos en distintos niveles de altura derivó en la rápida implementación de una red de radiosondas con lanzamientos periódicos (Figura 4).

Posteriormente en la década del sesenta, el desarrollo de sensores especializados dio lugar a las ozonosondas*, que han entregado datos cruciales para la vigilancia de la atmósfera respecto de las alteraciones antrópicas como la desaparición del ozono estratosférico en la Antártica y el efecto en la estratósfera del calentamiento global. Ejemplos del uso de datos de ozonosondas para analizar la distribución vertical de Ozono en Santiago se pueden ver en Seguel *et al* 2013, y para observaciones de Isla de Pascua ver Gallardo *et al* 2016.

LA INCORPORACIÓN DE DATOS SATELITALES

En la década del cincuenta, con la introducción de las tecnologías satelitales*, se obtuvieron por primera vez imágenes de la Tierra desde el espacio. Los meteorólogos pudieron ver la cobertura y el movimiento de las nubes, derivar la dirección e intensidad del viento (al nivel de las nubes) o estimar la cantidad total de vapor de agua. La asimilación de estos nuevos datos en los modelos de predicción numéricos (que ya contaban con los datos de las estaciones y las radiosondas), aumentaron enormemente la exactitud de los pronósticos.

Históricamente la importancia de los datos satelitales es mucho mayor en el hemisferio Sur (donde los satélites comenzaron a observar en 1979) dado que cuenta con menor densidad de observaciones de superficie y de radiosondas que el hemisferio Norte. Chile se ve particularmente

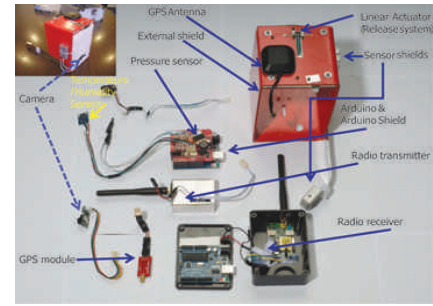


FIGURA 4.
RADIOSONDA CONSTRUIDA POR ALUMNOS DE LA FCFM. MIDE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA, PRESIÓN Y VIENTO, ADEMÁS DE TOMAR FOTOGRAFÍAS. MÁS REFERENCIAS EN "THE LIFE-CYCLE OF A RADIOSONDE" FLORES ET AL 2013.

beneficiado por los datos satelitales: en las zonas no tropicales, los sistemas se mueven en general de Oeste a Este, por lo que casi no contamos con información a nivel de superficie de la mayoría de los frentes, que llegan desde el Océano Pacífico, una de las zonas con menos observaciones del planeta.

Un sistema muy usado, en Chile y el mundo, fue el satélite polar TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) que contaba con sensores pasivos y activos. En la Figura 5 se puede ver las imágenes generadas para un día por los instrumentos que se encuentran a bordo del satélite. TRMM operó desde 1997 a 2015 y sus funciones están siendo reemplazadas por la plataforma GPM (Global Precipitation Measurement) que entrega los únicos datos de radar* actualmente disponibles para Chile.

En muchos países una de las grandes dificultades para los sistemas de monitoreo climático, es el costo de compra y de manejo de los instrumentos. Las estaciones meteorológicas automáticas por su costo y complejidad de operación, no están completamente diseminadas en muchas naciones. Cada equipo de radiosonda que se lanza cuesta ~ 200 USD, y cada ozonosonda cuesta ~1.000 USD.

En Chile, si bien la Dirección Meteorológica (DMC) cuenta con estaciones automáticas desde

* VER GLOSARIO EN PÁGINA 41.



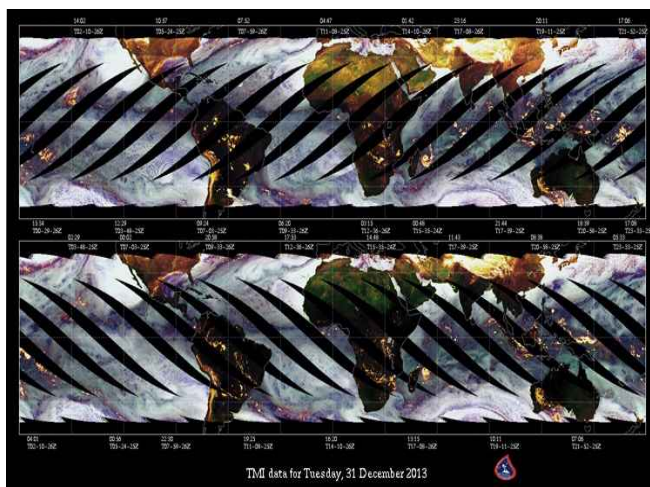


FIGURA 5.
IMAGEN RECONSTRUIDA DE MEDICIONES EN ONDA MICROONDA DEL SATÉLITE TRMM, PARA UN DÍA ESPECÍFICO.

FUENTE: NASA.

2012, mantiene su red de estaciones convencionales. Se lanzan radiosondas desde cinco estaciones al menos una vez al día, como parte del sistema de la OMM, y una ozonsonda desde Isla de Pascua ocasionalmente (un lugar especialmente privilegiado en el mundo para realizar mediciones, por su ubicación al medio del Océano Pacífico, de acuerdo a Gallardo *et al* 2016). Cabe destacar que Chile no cuenta con un radar meteorológico*, instrumento usado en muchos países para diagnosticar en tiempo real eventos de precipitación extremos.

Por otro lado, implica esfuerzos técnicos y económicos, las comunicaciones dedicadas a un sistema central, la construcción y mantención de la base de datos, así como la generación de controles de calidad, y la disponibilidad de los datos a tiempo y por los canales apropiados.

Para obtener datos confiables, es extremadamente importante contar con instrumentos bien calibrados, con un detallado registro de mantenimientos y cambios de ubicación, evitar pérdida de datos por comunicaciones defectuosas, o respaldos inadecuados.

En relación con las redes de monitoreo superficiales, es necesario conocer la adecuada ubicación, densidad y cuantificar la cantidad de información que pueden aportar. Estos temas constituyen un área de investigación que ha estado desarrollando el (CR)2. Se han diseñado métodos para establecer la calidad –en términos de qué estaciones son representativas de su zona, o qué estaciones proporcionan información especial– y la evolución de las redes usando métodos estadísticos (Osses *et al*, 2013), y herramientas de análisis variacional (Henríquez *et al*, 2015). Esta investigación se ha aplicado a redes de calidad del aire de Santiago, y se encuentra en desarrollo su uso para analizar redes de estaciones de datos meteorológicos de Chile.

HOY EN EL MUNDO: SISTEMAS DE OBSERVACIÓN

Los desafíos actuales apuntan a manejar las crecientes fuentes de información, incorporarlas a

GCOS Surface Network
(1017 Stations)



GCOS Secretariat, 1 March 2014

FIGURA 6.
RED DE ESTACIONES SUPERFICIALES DEL SISTEMA GLOBAL DE OBSERVACIÓN DEL CLIMA (GCOS). ESTACIONES SELECCIONADAS DE LA RED COMPLETA, CON ESTÁNDARES ESTRUCTOS ORIENTADOS A MONITOREAR EL CAMBIO CLIMÁTICO.

FUENTE: ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE METEOROLOGÍA.

las simulaciones y así proporcionar servicios climáticos. Éstos son información climática procesada, de utilidad para la planificación o toma de decisión de sectores productivos u otros sectores específicos de la sociedad.

Para monitorear y predecir fenómenos asociados al cambio climático, así como apoyar a las naciones en la implementación de medidas de adaptación y mitigación, están confluyendo varias iniciativas tendientes a la integración y estandarización en los formatos y comunicaciones de los distintos componentes de los sistemas de observación, como asimilación de datos*, reanálisis* del clima de la Tierra y escenarios modelados, basados en una serie de proyecciones climáticas.

MODERNIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LA OMM

En la actualidad, los datos meteorológicos se reúnen a través de las redes nacionales de observación terrestre, marítima, desde aeronaves, radiosondas y radares terrestres de los servicios meteorológicos nacionales. Las plataformas sate-

* VER GLOSARIO EN PÁGINA 41.

litas en tanto, muchas veces son administradas por conjuntos de países con convenios de colaboración o intereses en común.

Históricamente, la entidad coordinadora es la Organización Mundial de Meteorología (OMM), cuyo Sistema Mundial de Observación (SMO) congrega 11.000 estaciones de observación terrestre, 4.000 estaciones de buque —que realizan mediciones al menos cada tres horas, u horaria— 1.200 boyas a la deriva con estaciones meteorológicas automáticas, y 1.300 estaciones que lanzan sondas regularmente 1 o 2 veces al día. Además

recibe información de unas 300 aeronaves sobre vientos y temperaturas. Todos estos datos (incluidos los reportes horarios de las estaciones chilenas) se transmiten por el Sistema dedicado de Telecomunicaciones Globales de la OMM (Figura 6).

Pero la OMM está reestructurando tanto sus sistemas de observación, que hasta ahora funcionaban de manera independiente, como su sistema de comunicaciones. El Sistema Mundial de Observación (SMO), la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) y el Sistema Mundial de Observación del

Ciclo Hidrológico (WHYCOS), pasarán a formar parte de un sistema integrado, que funcionará sobre una plataforma de comunicación e información común, que utilizará también Internet y servicios web: WMO Integrated Global Observing System WIGOS (www.wmo.org).

LAS OBSERVACIONES EN LOS SERVICIOS CLIMÁTICOS

Las bases de datos meteorológicos del mundo, están dejando de ser meros catálogos que apuntan a archivos descargables, para comenzar a

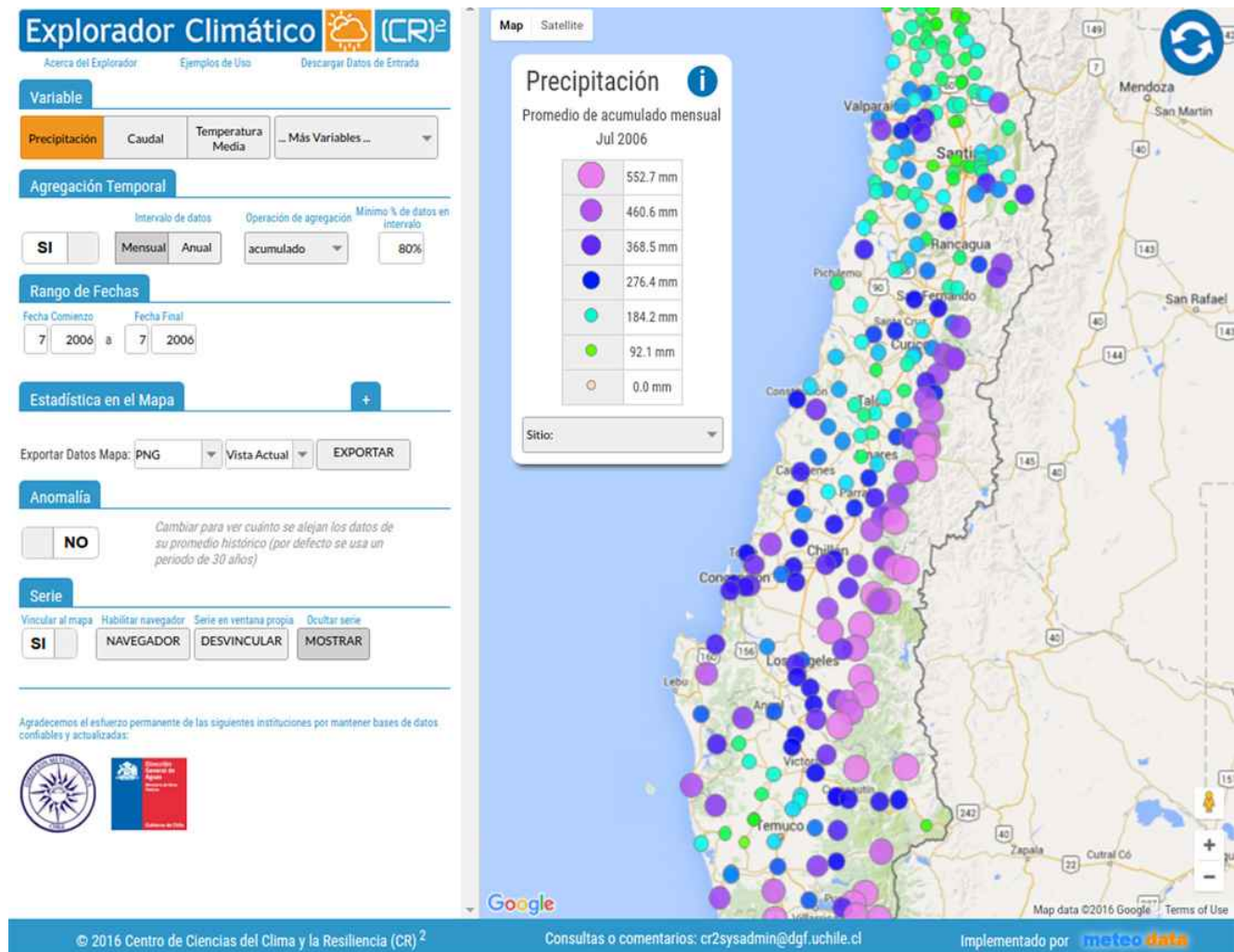


FIGURA 7. EXPLORADOR CLIMÁTICO, DESARROLLADO POR EL (CR)2, CUENTA ACTUALMENTE CON DATOS DE LA DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE Y LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.

FUENTE: (CR)2.



FIGURA 8.
ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DEL DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (FCFM) DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. FUENTE: DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA, FCFM, DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE.



FIGURA 9.
FOTOGRAFÍA DE CUMULONIMBUS, TOMADA DESDE EL TECHO DEL DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (FCFM) DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE, POR EL PROF. ROBERTO RONDANELLI.

proveer servicios web, interfaces para desarrolladores y aplicaciones útiles para usuarios finales. En Chile por ejemplo, (CR)2 está desarrollando un Explorador Climático que permite visualizar mapas y series de tiempo de variables meteorológicas de interés (<http://explorador.cr2.cl>), y acceder a los datos con una interfaz automatizada (Figura 7).

Desde 2002 se ha visto en cumbres internacionales el amplio interés en las observaciones terrestres relativas a desastres naturales, salud, energía, clima, agricultura, ecosistemas, biodiversidad y agua. Esto llevó a la creación del Grupo de Observaciones de la Tierra (GEO) en 2005, del cual participan 100 países incluido Chile, y 93 organizaciones incluida la OMM, que incorporará sus datos y sistemas a la plataforma que propone GEO. Esta plataforma común es GEOSS, que espera ser el Sistema Global de Sistemas de Obser-

vaciones de la Tierra, basado en redes de observación ya existentes de datos intersectoriales y multidisciplinarios, sistemas de visualización y productos en línea, sobre una base de comunicación interoperable y metadatos estandarizados.

Copernicus es la iniciativa de Europa para aportar a GEOSS, que congrega los sistemas de observación terrestres, aéreos, marinos y satelitales de Europa. El objetivo es generar servicios climáticos para múltiples ámbitos productivos y sociales. Las primeras implementaciones son: el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera que vigila los cambios en la composición química de la atmósfera y provee pronósticos diarios de calidad del aire y Gases de Efecto Invernadero, y el Servicio de Monitoreo del Clima, que aún se encuentra en desarrollo y que servirá para monitorear y predecir el cambio climático y sus impactos en sectores económicos relevantes.

En el contexto de los desafíos y los avances que estamos viendo a nivel mundial, desde Chile debemos tener la suficiente claridad de la importancia y la necesidad de mejorar nuestros sistemas de observación, nuestros registros y la forma de compartirlos, tanto para nuestras predicciones y escenarios futuros, como para la integración de los datos a nivel mundial. Es urgente que se disponga de recursos económicos, traducidos, por ejemplo, en instrumentación necesaria y mayor investigación en este campo; en recursos humanos, con profesionales a la vanguardia de los estándares internacionales; y repensar la institucionalidad actual para darle más relevancia a nuestras organizaciones actualmente a cargo de estas materias. Chile requiere de mayores avances en el campo de la climatología y la meteorología, tiene mucho por avanzar y mucho que aportar y sin lugar a dudas ésta es una disciplina transversal a todos los sectores económicos y sociales del país. ■

REFERENCIAS

- Jennings, S. (2011) Time's Bitter Flood: Trends in the number of reported natural disasters, Oxfam GB IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- CR2 «La megasequía 2010-2015: una lección para el futuro» Informe a la Nación del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.
- Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz (2015), Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent mega-drought in central Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 42.
- Rutllant, J., Muñoz, R., Garreaud, R. 2013. Meteorological observations in the northern Chilean coast during VOCALS-Rex. *Atmospheric Chemistry and Physics. VOCALS-REx Special Issue.* 13, 3409-3422.
- Seguel, R., Mancilla, C., Rondanelli, R., Leiva, M., Morales, R (2013). Ozone distribution in the lower troposphere over complex terrain in Central Chile *Journal of Geophysical Research Atmospheres* VOL. 118, 1–15.
- Gallardo, L., Henríquez, A., Thompson, A. M., Rondanelli, R., Carrasco, J., Orfanos-Cheuquela, A. and Velásquez, P., The first twenty years (1994-2014) of Ozone soundings from Rapa Nui (27°S, 109°W, 51m a.s.l.), *Tellus B*, 2016. (Accepted).
- Osses, A., Gallardo, L. and Faúndez, T. (2013). Analysis and evolution of air quality monitoring networks using combined statistical information indexes. *Tellus B* 65.
- Flores, F., Rondanelli, R., Díaz, M. Querel, R., Mundry, K., Herrera, L.A., Pola, D., Carricajo, T. (2013): The Life Cycle of a Radiosonde. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 187–198.

GLOSARIO

- Sinóptico:** fenómenos meteorológicos de escalas temporales de días y miles de kilómetros de extensión.
- Anomalía:** cantidad en que se aleja la variable meteorológica de su promedio histórico (típicamente un período de 30 años o más).
- Radiosonda:** instrumento que mide variables meteorológicas en distintos niveles de presión y las transmite a un aparato receptor fijo. Se lanza a la estratósfera usando un globo inflado con helio o hidrógeno.
- Ozonosonda:** similar a una radiosonda, pero con un sensor que también mide la concentración de ozono en distintos niveles.
- Modelo meteorológico:** Programa que resuelve las ecuaciones de movimiento de la atmósfera.
- Satélites meteorológicos:** tipos de satélites que pueden estar fijos rotando a la misma velocidad que la Tierra (geoestacionario) capturando imágenes periódicamente, o de órbita polar (recorren la Tierra de polo a polo), que cuentan con sensores pasivos que miden radiaciones microonda que provienen de la Tierra, o sensores activos como los radares (este es el único instrumento desde el espacio que puede observar de manera inequívoca la presencia de precipitación).
- Radar meteorológico:** son sensores activos que emiten un pulso en microonda electromagnética, capaz de observar precipitación. Puede estar ubicado en tierra firme o adosado a un satélite.
- Reanálisis:** campos generados por un modelo meteorológico que incorpora observaciones.
- Asimilación de datos:** incorporación de observaciones (de superficie, satelitales, de radiosonda, aeronaves, etc.) de manera de ajustar un modelo físicamente.