

Producciones Científicas. Sección: Ciencias de la Tierra y Ambiente

Búsqueda de sitio astronómico en el noroeste argentino

Autores: Pablo G. Recabarren (1,2,3); Hernan Muriel (1,2); Mirta B. Mosconi (1) (*); Diego Garcia Lambas (1,2); Marc Sarazin (4) & Riccardo Giovanelli (5).

Dirección: pablo@oac.uncor.edu, hernan@oac.uncor.edu, atrim@oac.uncor.edu, dgl@oac.uncor.edu, msarazin@eso.org & riccardo@astro.sun.cornell.edu.-

- (1) Grupo IATE, Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba.
- (2) CONICET.
- (3) Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- (4) European Southern Observatory.
- (5) Department of Astronomy, University of Cornell.

(*) Fallecida el 4/5/2003.

1) Introducción

La moderna astronomía plantea exigencias cada vez más rigurosas tanto a equipamiento, como a la calidad de los sitios en los cuales operan las grandes facilidades observacionales de gran poder y alta resolución. Los elevados costos de telescopios como el VLT (Very Large Telescope) o el NTT (New Technology Telescope), no permiten que éstos se instalen en lugares en los que una atmósfera turbulenta o un cielo con demasiada nubosidad, impidan obtener el máximo rendimiento de tales instrumentos.

No son pocas las instituciones dedicadas a la investigación del cosmos, que se encuentran abocadas a la realización de megaproyectos observacionales de gran escala. Entre ellas, el Observatorio Europeo Austral (ESO), y el Departamento de Astronomía de la Universidad de Cornell están actualmente dedicadas a la búsqueda de los mejores lugares sobre la superficie del planeta, en donde instalar instrumentos de gran envergadura y moderna tecnología.

El ESO se encuentra en la etapa inicial de desarrollo del proyecto Over Whelmingly Large Telescope (OWL = "Buho"), el cual a la fecha de su concreción, podría ser el telescopio más grande del mundo (www.eso.org/projects/owl).

Por su parte, la Universidad de Cornell, integra un consorcio con otras instituciones estadounidenses (Universidad de Chicago, National Optical Observatory), cuyo objetivo es la puesta en marcha de un telescopio de grandes dimensiones que operará en la banda del infrarrojo.

La determinación de las condiciones de un sitio destinado a la observación astronómica es una tarea que demanda de precisa información sobre parámetros que son fundamentales y que deben ser monitoreados durante largo tiempo, a fin de obtener una estadística robusta sobre la que se apoyará su postulación.

No siempre se cuenta con el tiempo suficiente que permita caracterizar adecuadamente la el cielo de un lugar ni es frecuente contar con información climatológica histórica confiable para obtener conclusiones aceptables que permitan minimizar los riesgos de instalar instrumentación costosa en un sitio inadecuado.

Atento a esto, la temprana realización de prospecciones en sitios candidatos se justifica siempre, ya que permite una buena caracterización, respaldada por estudios lo suficientemente prolongados en el tiempo como para lograr confiabilidad a largo plazo.

El grupo de Investigaciones en Astronomía Teórica y Experimental (IATE) del Observatorio Astronómico de Córdoba desarrolla, en colaboración con el ESO, la Universidad de Cornell y el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), un trabajo de “búsqueda de sitio” en el Noroeste argentino (NOA) cuyo primer objetivo es el de detectar un sitio adecuado para los grandes proyectos anteriormente mencionados, y en segundo termino, contar con un mapa de lugares de buena calidad para la observación astronómica, dentro de territorio argentino, a los efectos de contar con estudios previos de largo plazo, ante la posibilidad de instalación futura de grandes instrumentos, ya sean éstos de instituciones nacionales, como del exterior.

Cabe destacar que el grupo cuenta con una buena experiencia en tareas de medición de parámetros de calidad de cielo en ambientes rigurosos, habiendo hecho campañas prolongadas de medición en Antártida y en el llano de Chajnantor, en la altiplanicie de Atacama, Chile.

2) Metodología de una Búsqueda de Sitio

No son pocos los aspectos que deben ser considerados en una “búsqueda de sitio”, de entre los que mencionamos la nubosidad del lugar, los contenidos de vapor de agua, la altitud, la logística del lugar, la climatología en general, la diafanidad y transparencia de la atmósfera, la presencia de turbulencia en las capas atmosféricas y la existencia de instituciones de investigación que puedan constituirse en apoyo científico del proyecto.

Vamos a describir a continuación la metodología empleada para el caso del Noroeste argentino y de cuya aplicación se desprende que el rea ubicada entre los paralelos 23° y 28° de latitud Sur, y entre la línea meridiana de 66° 30' y el límite con Chile, como las mejor, dentro del territorio argentino para trabajos de observación astronómica.

2.a) Nubosidad

Es tática la importancia que tiene para nuestros fines, que el sitio candidato tenga baja nubosidad y de que cuente con un elevado porcentaje de su tiempo con condición de despejado. Menos clara es la necesidad de que los contenidos de vapor de agua sean bajos, para lo que simplemente nos limitaremos a comentar que este componente atmosférico es el principal causante de atenuación de la radiación infrarroja que ingresa a nuestra superficie portando información de interés, sobre todo en el campo de la cosmología.

Es frecuente que los sitios que se muestran “a priori” como adecuados para trabajos de observación, sean sitios con una fuerte condición de aislamiento y con climatología rigurosa. Para el caso particular del NOA, también se presenta el inconveniente de lo extenso del territorio a

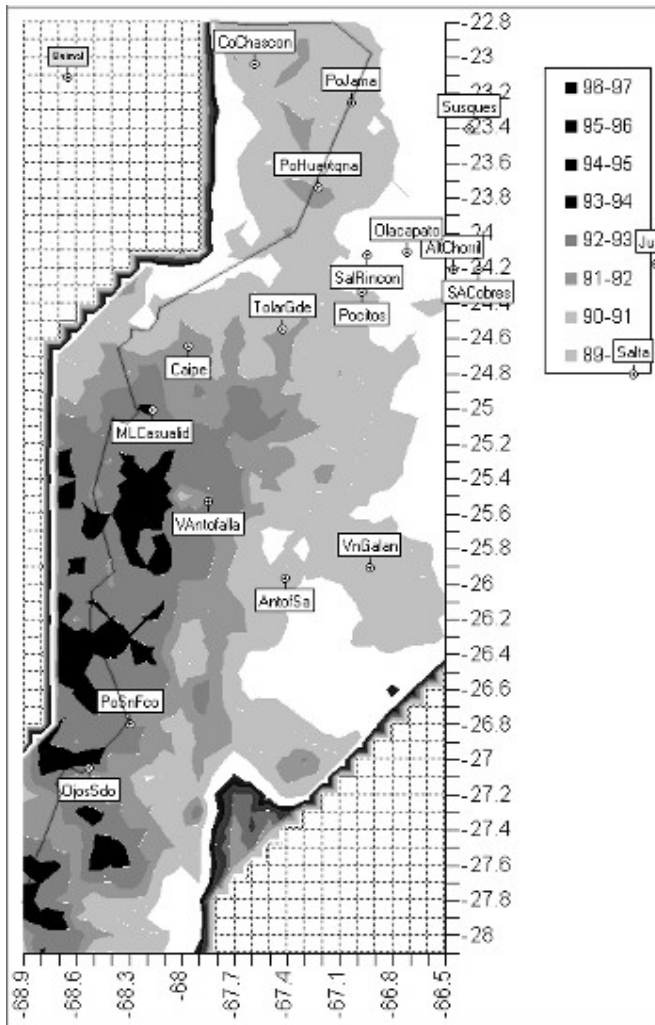
estudiar. También es frecuente, como consecuencia de lo expuesto, que no se cuente con mediciones previas u observaciones meteorológicas anteriores a la prospección.

La solución que surge ante esta problemática es el estudio previo del área a explorar, mediante la utilización de información obtenida por satélites. En nuestro caso se emplean imágenes de satélites GOES en la banda de los 10,4 micrones, para detectar la presencia de nubes y en 6,8 micrones para la determinación de la distribución geográfica de concentración de vapor de agua.

La metodología usual para la calibración de las imágenes en la banda de 10,4 micrones, se basa en obtener la variación de temperaturas con la altitud a partir de los resultados de sondeos de incidencia vertical y extenderlos a las áreas de interés. La metodología indica que una lectura de temperatura inferior a la esperada para un altitud dada se debe a la presencia de nubes, siendo la diferencia de temperaturas indicativa de la altura del techo de nubes y por ende, del tipo de nubes.

Lamentablemente la aplicación de este método es válida, en la medida de que la distancia entre el sondador y el área de interés no sea mayor a unos 300 km, y la estación de sondeo más cercana a nuestra región de trabajo esta en la Quebrada de Humahuaca, con lo que la información generada por esta estación no nos es útil. Ante este inconveniente, se optó por un método estadístico, desarrollado por nosotros, el cual se verificó como adecuado. Estadísticamente se determinan los valores de temperatura normales para una determinada hora del día, o de la noche, en un determinado mes del año y si la temperatura del lugar sensada por el satélite es inferior a la que suponemos como normal, o mas probable, se presume la presencia de una formación nubosa. La resolución del mapeo de nubes así obtenido es de unos 10 km, lo cual se considera adecuado para nuestros fines. De esta manera y analizando la información de imágenes de los años 1999, 2000, 2001 y 2002, de cuatro imágenes por noche, se obtuvo el mapa de porcentajes de nubosidad de la Figura 1.

Figura 1. Distribución geográfica de porcentajes de cielo despejado durante las noches.



Existe un grado de incerteza en la determinación de la presencia de nubes en locaciones de gran altura (cumbres elevadas por encima de los 6000 m, con glaciaciones), pero dado a que por razones topográficas estas ubicaciones geográficas son excluidas como posibles sitios candidatos, por las dificultades logísticas que impone esta condición, el método empleado no pierde su validez.

Es importante destacar que los resultados coinciden ampliamente con los obtenidos por autores de mayor experiencia en estudios meteorológicos (Erasmus, D., 2002). Se pretende continuar con este tratamiento a medida que se cuente con más información suministrada por el satélite.

Una primera consecuencia de lo analizado fue la eliminación de la zona de Interés de regiones por debajo de la latitud de los 28°, a partir de la cual se observa un importante aumento de la nubosidad media (Erasmus, D. And Van Staden, C., 2001). El área original de trabajo

llegaba hasta los 32° Lat. Sur, y actualmente el estudio se limita a los 28°, como se mencionó en la introducción.

El tratamiento de las imágenes en la banda de 6,8 micrones, para la obtención de las concentraciones de vapor de agua tiene ligeras diferencias, aunque conceptualmente es similar. Este estudio está a cargo del IAR y dado a que se comenzó con este análisis con posterioridad al estudio de nubosidad, aún no se cuenta con resultados definitivos.

El software empleado en este tratamiento es una modificación propia de Gview, aplicación desarrollada por K.Dean, en lenguaje IDL (Interactive Data Language).

2.b) Climatología.

El comportamiento del clima del sitio candidato es, obviamente, de gran importancia, aunque hay parámetros cuya incidencia en la calidad del lugar puede no ser tan obvia como pareciera. Un ejemplo de esto es el viento. No es la intensidad del viento lo que más determina una mala o buena condición para la observación, contrariamente a lo que se pudiera suponer, sino su régimen. Vientos de régimen laminar producen gradientes adecuados en la densidad atmosférica y los frentes de onda provenientes de fuentes de luz (estrellas) no sufren desviaciones por refracción demasiado aleatorias, lo cual produce imágenes nítidas y de poca movilidad. Lo contrario ocurre con regímenes turbulentos de vientos, en los que la luz de una estrella sufre permanentes desviaciones cuya consecuencia inmediata son imágenes borrosas y de pobre resolución.

Otro factor climático de importancia son los regímenes de precipitaciones del lugar, aunque en este caso las consecuencias son más claras que en el caso de los vientos.

Otros elementos a tener en cuenta son la dirección del viento, la radiación solar, la presión atmosférica, la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Es importante contar con registros de estaciones meteorológicas para obtener una adecuada caracterización en un entorno local. Para el desarrollo de este proyecto, se cuenta con dos estaciones meteorológicas provistas por la Universidad de Cornell, a instalar en dos locaciones a determinar una vez determinados y acotados en cantidad, los sitios de interés.

2.c) Topografía.

La topografía del terreno es de gran importancia por tres razones fundamentales. En primer término y desde lo económico y logístico, la topografía del terreno es condicionante de la obra civil del futuro observatorio.

En nuestro caso, es requerimiento de instalación del OWL, que se cuente con espacios planos de más de 1km x 1km, necesario para la obra civil de este proyecto. Se encontraron varios sitios que satisfacen esta condición en la región estudiada.

En segundo término, y más importante aún que el aspecto anterior es que la topografía, juntamente con la dirección del viento determinan el régimen o tipo de éstos. Una topografía de formas suaves y sin grandes elevaciones hacia la dirección desde donde sopla el viento, nos producirán regímenes laminares. En el caso que nos ocupa, la dirección preferencial del viento, durante gran parte del año, es el Oeste. Por el contrario, elevaciones por sobre el nivel de observación, hacia el Oeste de nuestra región puneña, serán causa probable de turbulencias que afectarán a las imágenes que se pudieran obtener con detectores ópticos.

Se buscan sitios altos que presenten hacia el Oeste, paisajes bajos sin elevaciones por encima del nivel de la futura instalación.

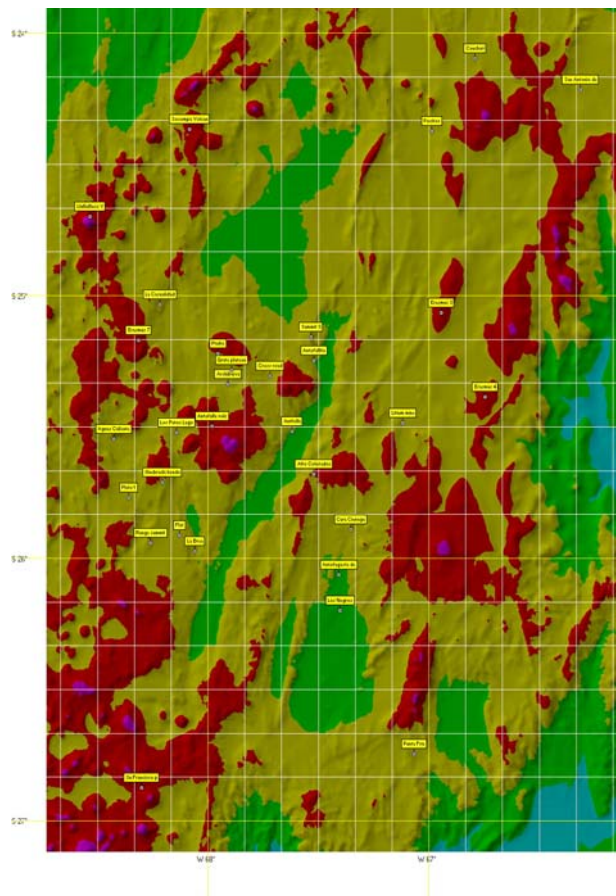
Finalmente y sobre todo para el caso de trabajos de astronomía en el infrarrojo, las concentraciones de vapor de agua, principal limitador en esta banda del espectro, disminuyen con la altura y lo hacen dramáticamente por sobre la capa de inversión térmica, obteniéndose mejores condiciones de observación en el infrarrojo, por encima de los 5000/5500 metros de altura.

Para el presente trabajo se contó con tres herramientas valiosas a fin de poder obtener información de la topografía de los sitios de interés, previo a la exploración en el terreno. Una de estas herramientas son las imágenes satelitales realizadas en la banda visible del espectro, habiéndose empleado imágenes Landsat y SPOT, en segundo lugar, el Digital Elevation Model (DEM), o Modelo Digital de Elevaciones, el que consiste en un mapa global de alturas realizado para todo el planeta en diferentes resoluciones, de las que en este caso, se empleó un DEM de 1 km de resolución, ya que es de carácter público, y aunque sería más adecuado emplear un modelo de 100 m de resolución, el utilizado permite una buena aproximación con resultados aceptables.

Finalmente se empleó Oziexplorer para llevar a la cartografía digital, la información de rutas y way points tomados en el terreno con GPS.

La combinación de estos tres valiosos recursos técnicos permite realizar en gabinete gran parte de la tarea, lo que es recompensado en el terreno, al contar con información geográfica precisa y confiable.

Se muestra en la figura el mapa DEM de la zona correspondiente al área de interés explorada.



Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del área de estudio.

2.d) Calidad del Cielo (“seeing”).

Los componentes atmosféricos y su dinámica e interacción con la geografía de un lugar, son el principal factor que condiciona lo que en astronomía se conoce como Calidad del Cielo o “**seeing**”. El seeing de un lugar es un parámetro característico de un sitio determinado y es consecuencia directa de la turbulencia atmosférica.

El afán de obtener información proveniente de objetos celestes remotos y de extremadamente baja intensidad, obliga al desarrollo de instrumentos de alta sensibilidad y alta resolución espacial.

En astronomía, la resolución espacial se mide como una medida angular del diámetro aparente de un objeto, generalmente, en segundos de arco.

La resolución de un telescopio es directamente proporcional al diámetro del espejo o superficie colectora de luz e inversamente proporcional a la longitud de onda. Esto nos dice que para lograr altas resoluciones o poderes separadores, se necesitan instrumentos de gran diámetro.

Por ejemplo, un pequeño telescopio reflector óptico de 11 pulgadas de diámetro tiene un poder separador o resolución de 0,4 segundos de arco.

La turbulencia atmosférica produce desviaciones por refracción, al camino óptico de un frente de ondas proveniente de una fuente luminosa. Esto se traduce en que la imagen de un objeto celeste que incide sobre un detector se mueve, perdiendo nitidez e impresionando sobre el elemento sensible, una imagen mayor que la que corresponde a un instrumento dado.

El diámetro de la imagen, producto de su movilidad por turbulencia, de un objeto teóricamente puntual, medido en segundos de arco, se conoce como “seeing”, y es la medida de la calidad del cielo del lugar. Cuanto mas estable es la atmósfera del lugar, se obtendrán imágenes de menor movilidad y por ello, de menor tamaño sobre el sensor.

En la actualidad, los mejores sitios de observación tienen valores de seeing inferiores a 0,5 segundos de arco. No hace muchos años, un sitio con seeing del orden de 1,5 segundos de arco era considerado bueno, sin embargo hoy es incompatible con la resolución de los grandes telescopios y las cámaras de imagen de alta resolución con los que se obtienen la información astronómica necesaria para los trabajos de vanguardia, en este área de la ciencia.

La medición y caracterización del seeing de un sitio exige la realización de campañas en el terreno, durante períodos de tiempo prolongados que permitan, al igual que con la meteorología, estadísticas consistentes.

Existen diferentes tipos de instrumentos para realizar estas mediciones, aunque el mas empleado es la cámara DIMM (Differential Image Motion Monitor), o monitor diferencial de movilidad de imágenes (Figura 3). El grupo IATE ha desarrollado recientemente su propia cámara DIMM, la que se empleará en el terreno, una vez que se hayan acotado en cantidad , los sitios de interés dentro del área de prospección.



Figura 3. Dra.M.Mosconi operando una cámara DIMM en el Llano de Chajnantor (Chile).

2.e) Tectónica

La actividad sísmica de un sitio candidato es de importancia porque plantea una exigencia a la obra civil que se debe realizar.

Si dividimos la zona de interés en dos grandes regiones separadas por el límite entre las provincias de Salta y Catamarca, se verifica que la actividad sísmica al sur de esta línea es sustancialmente menor a lo que se observa hacia el norte. Estas condiciones se mantienen desde Mina La Casualidad, en Salta, hasta la Cordillera de San Buenaventura, inmediatamente al Norte del Paso de San Francisco.

Esta zona de interés esta calificada por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) como Moderada. En promedio, la región tiene valores entre 1.6-2.4 m/s^2 para los picos de aceleración del suelo con una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años. Estos valores son sustancialmente menores a los típicamente encontrados en los observatorios Chilenos, como por ejemplo Cerro Paranal (VLT), con 0.4 m/s^2 para los picos de aceleración del suelo.

Este factor es de suma importancia ya que se constituye en una ventaja de sitios candidatos en territorio argentino sobre lugares de otros países.

2.f) Logística

El factor de infraestructura de los lugares candidatos son los condicionantes del esfuerzo económico a realizar para la instalación de grandes facilidades astronómicas.

Es en este aspecto en el que la región explorada presenta uno de sus principales inconvenientes, ya que los lugares que se muestran como mas adecuados están en las áreas más aisladas e inaccesibles.

Cabe acá hacer reflexiones sobre lo que esta condición de inaccesibilidad implica y podemos afirmar que puede considerarse una ventaja desde el análisis de la contaminación lumínica y su proyección a largo plazo. Nada hace suponer que al Oeste del Volcán Antofalla vayan a establecerse asentamientos humanos que puedan producir contaminación del cielo a corto plazo, sin embargo queda claro que el esfuerzo económico en esta zona, debería incluir la construcción de caminos u otras vías de comunicación, como así también resolver el problema de la producción de energía y la provisión de servicios en este sector, prácticamente deshabitado

Llega el punto de considerar el impacto que todo esto pudiera producir en la vida de los escasos núcleos poblacionales y se concluirá en que un emprendimiento de este tipo sería no sólo beneficioso para la ciencia, sino que produciría además, un gran impulso a diversas actividades con el inmediato crecimiento económico del sector.

3) Resultados

Planteados los principales factores considerados en el presente trabajo y la metodología empleada para su determinación y/o estimación, y aunque aún no han sido completados algunos estudios, ya podemos presumir que los mejores sitios para la observación astronómica dentro de territorio argentino, y con buenas posibilidades de competir con importantes lugares de otros países, se hallan en el Oeste de la Provincia de Catamarca, y en el Suroeste de la Provincia de Salta.

Las ventajas de estos lugares son sus adecuados porcentajes de tiempo despejado, su altura media que en general excede los 4000m, la baja humedad ambiente y una relativamente baja actividad sísmica.

La principal desventaja de los lugares candidatos es su logística pobre o inexistente, lo que obligaría a grandes inversiones en el caso de decidirse la instalación de un gran observatorio.

El análisis de los diversos parámetros, excluyendo aspectos logísticos, nos indican que existen buenos sitios candidatos en la vecindad de la localidad de Antofagasta de la Sierra;

- 1) En elevaciones existentes al Este del extremo sur del Salar de Arizaro,
- 2) En inmediaciones de La Mina La Casualidad,
- 3) al Sur de la Sierra de Archibarca, al Nor Noroeste del Volcán Antofalla (Figura 4),
- 4) Al este del Cerro Aguas Blancas, próximo al límite con Chile (Figura 5),
- 5) una gran planicie al este de la locación anterior,
- 5) Sobre la Sierra de la Quebrada Honda, al Oeste del Salar de Antofalla,
- 6) Sobre la Sierra de Calalaste, en el límite Este del Salar de Antofalla, sobre su extremo sur,
- 7) En las estribaciones montañosas al Sur del área de Pasto Ventura, al Sur del Volcán Galán y del gran Campo de Piedra Pomez.
- 8) En la sierra inmediatamente al Norte del Salar del Hombre Muerto.
- 9) Al Este del Salar del Hombre Muerto.

Figura 4. Llano al Sur de la Sierra de Archibarca.

Figura 5. Llano al Este del cerro Aguas Blancas.

4) Conclusiones

Se concluye en que a partir del análisis de los diferentes factores que se tratan, existen sitios con buenas posibilidades de constituirse en futuros asentamientos de grandes facilidades observacionales astronómicas.

Existen en general serios inconvenientes de tipo logístico cuya solución traería aparejado un gran y positivo impacto, sobre todo en aquellos sectores que sufren actualmente una condición importante de aislamiento

Las relativamente bajas aceleraciones del suelo, con respecto a sitios en Chile, por ejemplo, se evidencian como una de las ventajas más importantes en relación a instalaciones existentes en el país vecino.

Esos resultados estimulan a continuar con los trabajos de reducción de imágenes de satélite, a fin de fortalecer los resultados obtenidos a la fecha, a instalar estaciones meteorológicas a los efectos de contar con registros que a la fecha son inexistentes y a comenzar a corto plazo con las campañas de medición de seeing, con el objeto de detectar los lugares de menor turbulencia atmosférica, de entre las locaciones preseleccionadas.

5) Bibliografía.

A Satellite Survey of Cloud Cover & Water Vapor in Northern Chile, 2001, D.A.Erasmus & C.A. van Staden, www.eso.org .

Forecasting Precipitable Water Vapor and Cirrus Cloud Cover For Astronomical Observatories. Erasmus, D.A. and M.Sarazin, 2000, SPIE Conference in Image and Signal Processing for Remote Sensing IV. SPIE-4168, Barcelona.

Optical seeing and infrared atmospheric transparency in the upper Atacama Desert, 2000, R.Giovanelli, Cornell University.

Report of the recognition trip of an astronomical site survey in Argentine NW, 2002, P.Recabarren & M.Mosconi, www.eso.org .

Site Testing en la Puna de Atacama, Boletín de la 44 Asociación Argentina de Astronomía, 2000 ,P.Recabarren & M.Mosconi.

An Analysis of Cloud Cover and Water Vapor for ALMA Project: A comparison between Chajnantor (Chile), Chalviri (Bolivia) and five sites in Argentina using satellite data and a verification of satellite PWV measurements. 2002. Erasmus, D.A., www.eso.org .

Utilizing Satellite Data for Evaluation and Forecasting Applications at Astronomical Sites. D.A.Erasmus and M.Sarazin, 2003, ASP Conferences.