

DETERMINACIÓN DE VIENTOS PARA LA INSTALACIÓN DE UNA ANTENA PARABÓLICA DE 35 M DE DIÁMETRO, A PARTIR DE UN PROGRAMA DE MODELOS DE FLUJOS DE AIRE Y DATOS DE SENSORES REMOTOS

Claudia Palese y Jorge Luis Lassig

*Ingeniería del Viento, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue,
Buenos Aires N° 1400, 8300, Neuquén, Argentina*

claudia.palese@fain.uncoma.edu.ar; jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar

Palabras Clave: antena parabólica, modelo diagnóstico de viento, sensores remotos, campos de viento, velocidades extremas, perfiles verticales de viento, Neuquén.

Resumen. En este trabajo se presentan los resultados del estudio de vientos en el sitio de ejecución del Proyecto Deep Space Antenna Network de la Agencia Espacial China, que por convenio con nuestro país y con la provincia de Neuquén instalará una antena parabólica, 38 m de diámetro, que sumado a la estructura de fijación tendrá una altura no menor a los 50 m. Además de esta estructura está prevista la construcción de otros edificios relacionados al manejo y mantenimiento de esta gran antena rastreadora. El sitio elegido para dicha instalación queda aproximadamente a 21 km al norte de la localidad de Bajada del Agrio, en el Departamento Loncopué de la Provincia del Neuquén, Argentina. Debido a que no hay mediciones de viento en el lugar se utilizó un modelo de flujo de aire y sensores remotos. La resolución espacial es de 496 m en los mapas de vientos medios anuales calculados a 10 m, 30 m y 50 m de altura sobre el nivel del suelo. Con los resultados del modelo se caracteriza la distribución de frecuencias de las velocidades y de las direcciones del viento, se establece la velocidad media por dirección, se calculan los vientos extremos, de intervalos de promediado de 10 minutos y 3 segundos, con períodos de retorno de 20, 50 a y 100 años mediante el empleo de metodologías desarrolladas en estudios de diseño de parque eólicos. Se estimó la variación de la velocidad del viento con la altura dentro de la capa límite atmosférica. Todos estos datos son necesarios para los cálculos estructurales del complejo de recepción satelital.

1 INTRODUCCIÓN

Las misiones espaciales cuyas sondas están posicionadas a distancias de la Tierra de más de 2 millones de kilómetros se denominan misiones al espacio profundo. Para establecer comunicación a esas distancias se requieren sistemas muy precisos, tanto de apuntamiento mecánico como de calibración de la antena. Para proporcionar una cobertura continua, compensado la rotación de la Tierra, se necesitan varias estaciones receptoras-transmisoras en el globo terrestre.

La Agencia Espacial Europea (ESA European Space Agency) ha inaugurado en nuestro país en el año 2.012 una estación de seguimiento de sondas para misiones de espacio profundo en la localidad de Malargüe provincia de Mendoza. Dicha estación llamada Deep Space Antenna 3 consta de una antena con forma parabólica de 35 metros de diámetro que tiene una masa de 610 toneladas y está ubicada a 1.550 m sobre el nivel medio del mar. Esta entró en servicio completo a principios de 2.013 con prestación de apoyo diario a las misiones Venus Express, Mars Express, Herschel y Planck.

Por otra parte, a mediados del año 2.012, autoridades nacionales y de la provincia del Neuquén firmaron un acuerdo con la República Popular de China para instalar en territorio provincial una antena de seguimiento para misiones al espacio profundo que será operada por la Agencia Espacial China (CNSA: China National Space Administration - DSA: Deep Space Antenna Network). China tiene una red de grandes antenas e instalaciones de comunicaciones para sus misiones de naves espaciales lunares e interplanetarias.

El elemento fundamental de las estaciones terrestres de espacio profundo es una antena parabólica de 35 a 45 metros de diámetro. La precisión en que se apunta la antena es de hasta 3,5 milésimas de grado, por lo tanto, se necesita una elevada rigidez mecánica y sensores que compensen la deformación de la estructura provocada por los cambios de temperatura y vibraciones. Por lo tanto, las características físicas de estas antenas dependen de las condiciones de comunicación (transmisión y recepción) de la misión espacial y de condiciones locales como las resistencias al viento o a los movimientos sísmicos.

En este trabajo se presentan las condiciones locales del viento a las que estarán sometidas la antena de transmisión y recepción para misiones al espacio profundo (DSA) e instalaciones anexas que se construirán en el norte de la provincia del Neuquén.

Las cargas producidas por el viento sobre las infraestructuras civiles son cargas fluctuantes, es decir, no estáticas, debido tanto a la turbulencia de la corriente incidente como a la no estacionariedad de los fenómenos asociados al desprendimiento de la capa límite en los cuerpos. Sin embargo, en muchos casos se establecen las cargas aerodinámicas promediadas en el tiempo (las cargas estáticas) para determinar los esfuerzos generados por el viento sobre las diversas estructuras.

Wyatt (1964) establece que la influencia del viento en antenas parabólicas y orientables debe ser considerada en relación con: la precisión del reflector (paraboloide); la precisión de apunte; las cargas en el sistema de accionamiento; la seguridad respecto de los vientos extremos; y la ausencia de oscilaciones.

Las fuerzas y momentos ejercidos por el viento sobre antenas parabólicas han sido estudiados experimentalmente en túneles de viento (Holmes, 2001).

La Figura 1 muestra la variación del coeficiente de arrastre, $C_D(\theta)$, de este tipo de antenas con respecto a la dirección del viento en un plano horizontal (θ), pudiéndose observar que el máximo arrastre, $D(\theta)$, ocurre cuando el viento enfrenta a la parábola (ángulo cero). Se observa también que el incremento en la intensidad de turbulencia del viento produce aumento del $C_D(\theta)$ y, por lo tanto, de $D(\theta)$ cuando los ángulos son menores a 20° .

La Figura 2 muestra la descomposición del arrastre, $D(\theta)$, en dos fuerzas, F_x y F_y . La fuerza F_y aporta un importante momento, M , sobre el pivote de apoyo de la antena.

La variación del momento azimutal, $M_{azimutal}$, y del momento altitudinal, $M_{altitudinal}$, como la suma de ambos (momento total, M_{total}), en función del ángulo zenital (β) se puede observar en la Figura 3. En ésta se muestra en trazo continuo el efecto de un flujo uniforme de viento (caso ideal) y en línea punteada el efecto del desarrollando del perfil vertical de la velocidad del viento en la capa límite atmosférica (caso real) que produce el incremento de los valores de los momentos sobre la antena.

El viento se caracteriza por su alta variabilidad espacial y temporal. El conocimiento de la intensidad del viento a la que estará sometida una estructura durante su vida útil se basa en el análisis de estadístico de registros de velocidades que se hayan hecho en el pasado en el sitio donde estará ubicada.

Los mapas eólicos presentan la variabilidad espacial de la velocidad del viento promedio anual en una amplia región. Los de las provincias de Mendoza (Hualpa y Milani, 2007) y del Neuquén (Pedro y otros, 2006), ambos a 50 metros de altura respecto de nivel del suelo, muestran que la antena china (DSA) que se instalará en el norte de Neuquén estará sometida a mayores velocidades que la instalada en el sur de Mendoza.

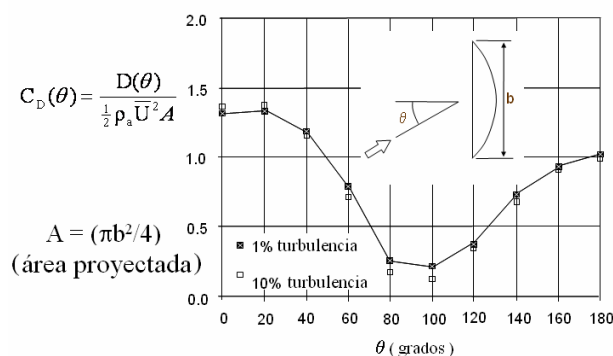


Figura 1: Variación del coeficiente de arrastre, C_D , con el ángulo de incidencia del viento, (θ), considerando dos intensidades de turbulencia del viento. La densidad del aire es ρ_a y \bar{U} es la velocidad media del viento (Modificado de Holmes, 2001).

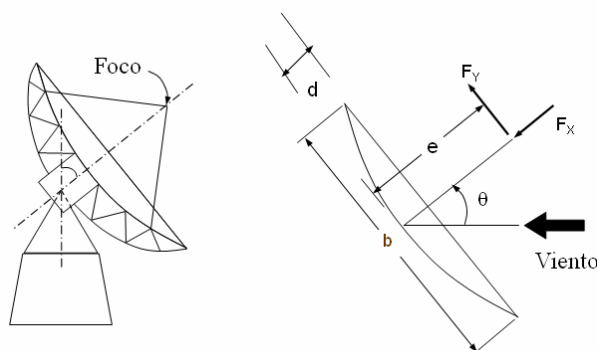


Figura 2: Cargas eólicas actuando sobre la antena parabólica. Donde, e es la longitud focal, b es el diámetro del disco, d es la profundidad del disco, F_x y F_y son las únicas componentes de la fuerza (o momento) debido a la simetría del disco, θ es el ángulo de incidencia del viento. (Modificado de Wyatt, 1964)

Sin embargo, la resolución espacial de los mapas eólicos provinciales, aproximadamente 1

kilómetro en ambas direcciones horizontales, no alcanza para determinar las velocidades del viento que serán utilizadas en el cálculo de las cargas eólicas, especialmente cuando las condiciones del terreno son complejas.

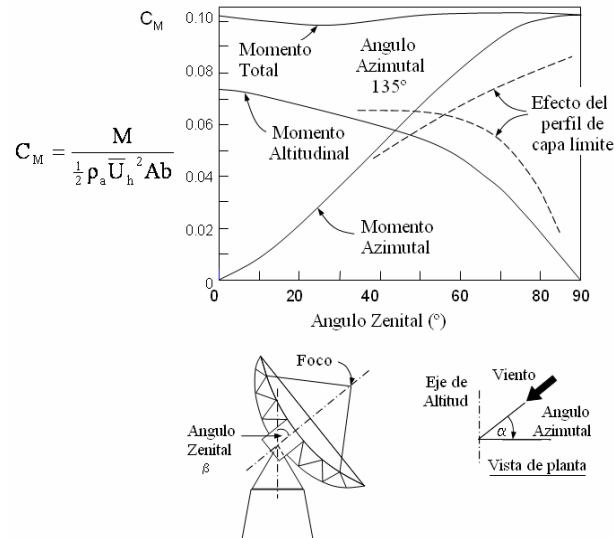


Figura 3: Variación de los coeficientes de momentos, C_M , de origen eólico (azimutal, altitudinal y total) actuando sobre la antena satelital en función del ángulo zenital, β . M es el momento y \bar{U}_h es el viento medio horizontal (Modificado de Holmes, 2001).

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología y los resultados del estudio de vientos, en valores medios anuales, en el sitio de ejecución del Proyecto DSA Network de la CNSA que instalará una antena parabólica de 38 metros de diámetro, que sumado a la estructura de fijación tendrá una altura no menor a 50 metros. También se determinarán la magnitud de los vientos extremos y el perfil vertical de la velocidad en la capa límite atmosférica.

2 METODOLOGIA

2.1 Sitio

El lugar de instalación de la antena parabólica queda aproximadamente 21 km al norte de la localidad de Bajada del Agrio en el Departamento Loncopué de la Provincia del Neuquén, Argentina, como se indica en la Figura 4 con la etiqueta DSA. En esta región la meseta patagónica está cubierta en su mayor parte por vegetación tipo arbustiva con follaje estacional que no supera 1,5 m de alto. La vegetación se ubica en forma muy dispersa dejando superficies de suelo desnudo, típico del paisaje árido que caracteriza el norte provincial (Figura 4).

De este lugar no se dispone de ningún tipo de datos meteorológicos pero sí hay mediciones en dos localidades cercanas. Hacia el Norte y distante 29 km está Chorriaca y hacia el Sur, distante 32 km está Quili Malal. Por ello, se establece como región de estudio una que abarca estas dos localidades, quedando el sitio de emplazamiento de la antena aproximadamente en el centro.

El terreno en esta región no es llano, la meseta patagónica presenta algunos cañadones, hondonadas y cerros otorgando características de terreno complejo.

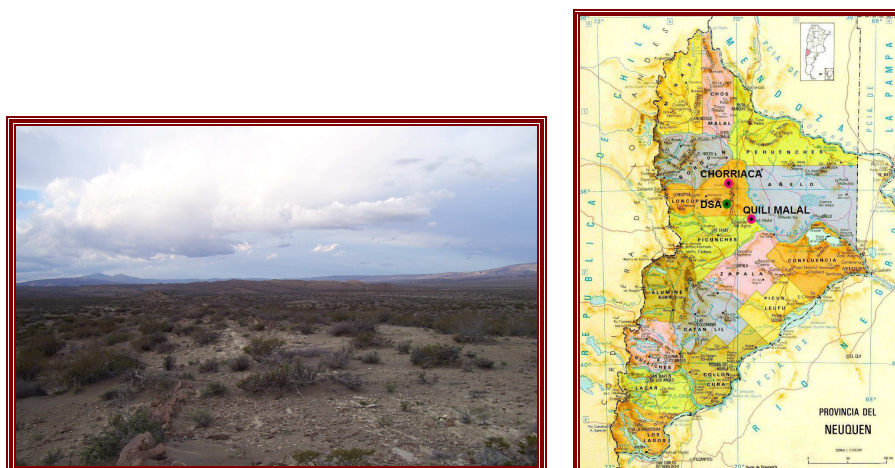


Figura 4: A la izquierda vista panorámica del lugar de interés (fotografía TecnoRed Ingeniería SRL). A la derecha ubicación geográfica del sitio y de las estaciones de medición de viento en Chorriaca y Quili Malal.

2.2 Modelo

Los datos de velocidad y dirección del viento medidos en estaciones de observación pueden ser utilizados para evaluar las condiciones eólicas en lugares próximos solamente si están bien expuestos y el terreno es plano. En terreno complejo la velocidad del viento varía significativamente en cortas distancias, por lo tanto, los datos de viento de un sitio no representan las condiciones eólicas de otra ubicación, aunque sean cercanos.

En estos casos, una de las metodologías utilizadas son los modelos numéricos que emplean los datos de mediciones cercanas al lugar de interés, siempre que estén sometidas al mismo régimen climático y que entre ellas no haya barreras orográficas. En Roatghi y Vaughn (1994) se describen algunos de ellos.

En este trabajo se emplea el programa ArgentinaMap, cerrado para el usuario, que es una actualización del software comercial WindMap™ desarrollado por Brower (1998).

El programa es un sistema de información geográfica al que se le ha incorporado un modelo numérico de flujo de aire. Este último es del tipo diagnóstico y representa en forma tridimensional la orografía, la rugosidad superficial y el viento. Describe la circulación en las capas bajas de la atmósfera que está conducida por el flujo de escala sinóptica. En Lassig y Palese (2011) se describen las características principales, por lo tanto, a continuación se lo presenta en forma resumida.

El modelo satisface la ecuación de conservación de la masa (1) cuya expresión bajo condiciones estacionarias y fluido incompresible es:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

El vector velocidad, V , tiene componentes $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$, $w(x,y,z)$ en las direcciones Oeste a Este, Sur a Norte y hacia arriba, respectivamente.

El modelo calcula el campo de velocidad del viento que se desvía la mínima cantidad posible de un campo de viento inicial derivado de datos observados. El ajuste necesario para lograr cero divergencia se determina mediante la resolución iterativa de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales. El modelo utiliza una malla de elementos finitos a lo largo de la región de interés. El campo de viento se ajusta en cada elemento de la malla hasta que la divergencia se reduce por debajo de un nivel de tolerancia especificado por el usuario.

Bajo la hipótesis de que la fricción interna debida a efectos viscosos es despreciable, y que

el escurrimiento es no estratificado, la circulación se conserva. Así, V se puede descomponer de la siguiente manera:

$$V = V^* + V_0 \quad (2)$$

siendo V_0 un campo de velocidades inicial de escurrimiento divergente, definido localmente en cada elemento mediante la interpolación inicial y V^* define la corrección necesaria para eliminar la divergencia local del flujo. Se debe cumplir que:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (V^* + V_0) &= 0 \\ \nabla \wedge (V^* + V_0) &= \nabla \wedge V_0 \therefore \nabla \wedge V^* = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

De la segunda condición (irrotacional) se deduce que existe una función potencial, ϕ , que representa al vector velocidad.

Para tener en cuenta la estratificación y la desviación respecto a las condiciones de estabilidad neutra, se afecta la ecuación de trabajo con los coeficientes τ_H , τ_V (tensor de transmisividad diagonal) a determinar. De este modo el potencial de velocidad perturbado resulta de la influencia del terreno y de los errores introducidos en las condiciones de inicialización del modelo.

Si el tensor de transmisividad es constante las velocidades de perturbación adicionan una corrección irrotacional al campo de escurrimiento eliminando la posible vorticidad presente. Una determinación del potencial de velocidad se realiza a partir de la ecuación de continuidad, forzando al flujo a ser no divergente. Por lo tanto, se llega a la expresión:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\tau_H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau_V \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \quad (4)$$

En lo que respecta a las condiciones de borde, las hipótesis son que las fronteras laterales son abiertas, y que el terreno y el techo del dominio, son superficies de corriente.

En las fronteras abiertas es, $\phi = cte. = 0$, en las superficies de corriente, en cambio, es $\partial \phi / \partial \eta = 0$, donde η es una dirección normal a la superficie de corriente. Si la velocidad observada cumple $dV_0/d\eta = 0$, entonces, también se cumplirá para la velocidad ajustada V^* .

Se utiliza una coordenada vertical transformada, σ , (coordenadas conformes a la superficie del terreno). Cuando σ es 1 se corresponde con el terreno y cuando es 0 con el tope del dominio que está determinado por el tope de la capa límite atmosférica.

Por lo anteriormente mostrado la ecuación de trabajo toma una forma mucho más compleja que se resuelve por métodos iterativos.

Dos factores tienen un gran efecto sobre los resultados de este modelo. El primero es el campo inicial de viento, porque si no representa las condiciones eólicas típicas de la zona en ausencia de influencias topográficas, entonces, los resultados pueden ser imprecisos.

El modelo primero calcula un campo inicial de viento que se deriva de observaciones de dirección e intensidad del viento de estaciones meteorológicas de superficie o datos de la atmósfera superior (viento geostrófico). La velocidad inicial en cada elemento de la malla resulta de hacer el promedio ponderado de los datos de superficie (o altura). La ponderación puede ser una constante (promedio de los datos disponibles) o proporcional a la inversa de la distancia al cuadrado de cada estación. La interpolación con funciones de punto tiene en cuenta: los registros de viento; el número de estaciones; la distancia horizontal desde cada estación al punto considerado; la diferencia de altitud entre la estación y el punto; y un

parámetro que permite dar mayor o menor peso a cada contribución. La componente de la velocidad normal al terreno (w_0) como es por lo menos dos órdenes de magnitud menor que las componentes horizontales (u_0 ; v_0) se la inicializa con cero.

El segundo factor corresponde a los cálculos relativos dados por los ajustes horizontales y verticales del campo de viento. El modelo utiliza un perfil de viento logarítmico en la capa de superficie que tiene en cuenta la interpolación horizontal previa, la rugosidad aerodinámica de la superficie y la estabilidad de la atmósfera. Por encima de la capa de superficie y hasta el tope de la capa límite atmosférica, el modelo asume una interpolación utilizando el viento geostrofico. Por encima de esta última, el modelo asume una variación lineal dada por el incremento de la velocidad con la altura en la atmósfera libre superior.

2.3 Datos

Dominio del modelo

El dominio de aplicación del programa es relativo a la disponibilidad de los datos de viento de las estaciones cercanas al lugar de instalación de DSA. Abarca desde $38^{\circ} 19' 48.41''$ lat. Sur a $37^{\circ} 55' 19.88''$ lat. Sur y desde $70^{\circ} 23' 9.22''$ long. Oeste a $69^{\circ} 48' 53.81''$ long. Oeste, que corresponden a las coordenadas cartográficas Universal Transverse Mercator, zona 19 Sur (Gauss Krüger, zona 2):

Sur y = 5.757.330 m (5.757.592,951 m);
 Norte y = 5.802.000 m (5.802.280,826 m);
 Oeste x = 378.410 m (2.378.356,343 m);
 Este x = 429.000 m (2.428.956,583 m).

Este dominio corresponde a una malla de 102 elementos en x y 90 elementos en y , que representa una superficie de 50.373 m por 44.670 m ($2.250 \text{ km}^2 = 22,5 \text{ ha}$). La resolución espacial horizontal con la que se necesita presentar los datos de viento es 500 m en ambas direcciones horizontales.

Viento

La inicialización se efectuó con las series de datos medidos con sensores calibrados de velocidad y dirección del viento en dos localidades cercanas al sitio de estudio: Chorriaca ubicada en $37^{\circ} 56' 17''$ Sur, $70^{\circ} 6' 5,75''$ Oeste, a 1.108 metros sobre el nivel del mar (snm); y Quili Malal localizada en $38^{\circ} 19' 36''$ Sur, $69^{\circ} 48' 53''$ Oeste, a 576 metros snm. Chorriaca tiene mediciones a 10 m y 30 m de altura sobre el nivel del suelo (sns) en un período de 3,6 años, desde el 27/05/2005 a las 11:50 hs hasta el 22/12/2008 a las 11:50 hs. En Quili Malal se midió a 10 m de altura sns durante 7,8 meses, desde el 27/05/2005 a las 16:30 hs hasta el 20/01/2006 a las 15:20hs.

Las tres series de vientos corresponden a registros de los valores medios en intervalos de 10 minutos con sus respectivas desviaciones estándares y máximos. Los datos fueron consistidos. Además, se realizó un análisis estadístico con el que se pudo verificar que las características eólicas del norte patagónico (Lassig y otros, 1999; y Palese y otros, 2000) están adecuadamente representadas, a pesar de la reducida longitud del registro de Quili Malal. El programa convierte los datos crudos a la forma de rosa de los vientos separando los registros en 12 componentes direccionales, es decir, cada 30° de dirección del viento.

La velocidad y la dirección del viento de la atmósfera superior, viento geostrofico, se descargaron del sistema Global Data Assimilation System (GDAS/NOAA). Corresponden a datos derivados de un modelo atmosférico. Se utilizó un período de 5 años desde Ene/2.000

hasta Dic/2.004. Los datos de viento son estimaciones cada 6 horas, es decir, 4 datos por día. Las alturas medias anuales de la atmósfera libre utilizadas en este trabajo fueron 3.072 m y 5.685 m, correspondientes a los niveles de presión de 700 hPa y 500 hPa, respectivamente.

Capa límite atmosférica

Las alturas de la capa de superficie (z_s) y de la capa límite atmosférica (z_{cl}) fueron estimadas en forma local para la posición central del dominio y son constantes a lo largo de este. El tope de la z_{cl} se descargó del sistema GDAS/NOAA. Se utilizó un período de 1 año (2.004) con datos estimados cada 6 horas (4 datos por día). La altura media anual resultó ser de 554 m. Además, del análisis de la distribución de frecuencias se advierte que tiene una extensión vertical menor o igual a 1.400 m en el 90 % del año. Debido a que la altura de la z_s se define como 0,1 del espesor total, se toma el valor 140 m para su altura.

El perfil vertical de la velocidad del viento utilizado por el modelo se basa en la teoría de la semejanza de Monin–Obukhov (MO), en la cual la estabilidad atmosférica se caracteriza mediante la longitud de estabilidad de MO, L . Cuando L tiende a infinito la atmósfera es neutral, con valores negativos es inestable y con valores positivos estable. El valor de L depende principalmente de la velocidad del viento a una altura dada, de la rugosidad superficial y del flujo de calor. El efecto combinado del flujo de calor y del viento en la turbulencia atmosférica está descrito mediante las clases de estabilidad que sirven como un indicador cualitativo de las características de la turbulencia cerca del suelo. Pasquill (1961) desarrolló un método destinado a la estimación de las condiciones de estabilidad de la atmósfera basándose en observaciones meteorológicas rutinarias y Turner (1964) introdujo una modificación al esquema de Pasquill. Golder (1972) mostró la relación entre L , la longitud de rugosidad y las clases de estabilidad.

En este trabajo se utiliza la siguiente expresión algebraica (Moreira y Tirabassi, 2004):

$$1/L = a (z_0)^b \quad (5)$$

donde z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica y a y b son coeficientes que dependen de la clase de estabilidad.

En la Sección que continúa se muestra la metodología empleada para calcular z_0 en cada nodo de la malla establecida en el dominio de aplicación del modelo. El valor utilizado en la Ec. (5) es único e igual a 0,005 m debido a que es el más representativo del área.

Para establecer las clases de estabilidad de Pasquill se utilizó la estimación del modelo atmosférico del sistema GDAS/NOAA del año 2.004 con datos cada 6 horas (4 datos por día). Se analizó la distribución de ocurrencia anual observándose que la capa límite con estabilidad neutral es la de mayor frecuencia, con L igual a 193 m.

Longitud de rugosidad aerodinámica

Dado que no hay mapas digitales de la longitud de rugosidad (z_0) del área de interés se utilizó una metodología indirecta basada en datos de sensores remotos satelitales para su elaboración. En particular se procesó una escena del sensor ETM+/Landsat7 del 20 de Enero de 2006 a las 11:30 hs, debido a la disponibilidad y a que está libre de nubosidad. Las bandas espectrales del sensor y la resolución espacial se muestran en la Tabla 1. La resolución radiométrica es de 256 niveles digitales. Para conservar los valores originales la imagen no fue corregida radiométricamente. La escena fue recibida con una corrección geométrica efectuada y en el sistema de coordenadas cartográficas Universal Transverse Mercator, Zona 19 Sur.

La definición del esquema de clasificación se basó en la necesidad de identificar en la imagen los 4 tipos de cobertura del suelo que hay en la región de interés y que se presentan en la Tabla 2. Una vez definidas las clases se procesó la imagen satelital mediante una clasificación no supervisada de las bandas 3, 4 y 5, que tiende a identificar las clases espectrales presentes en la imagen basándose en la habilidad del sensor en detectar las firmas espectrales de los distintos tipos de cobertura y usos del suelo. Este tipo de clasificador examina los datos de reflectividad de la imagen y los agrupa en conglomerados con un comportamiento espectral homogéneo (cluster analysis) que define las clases temáticas. Se utilizó una clasificación amplia con 2,5 % de saturación, reteniendo todas las clases encontradas. Las clases espectrales obtenidas se reclasificaron con la finalidad de producir las clases informacionales (Chuvieco, 1990). En esta instancia se eliminaron las clases menos significativas (menor que el 1 % del área total) como opción de agrupamiento. La rugosidad asignada a cada tipo de cobertura del suelo en la reclasificación se obtuvo de tablas de búsqueda (Spera, 1999; Stull, 1986).

Finalmente, el mapa de rugosidad fue rectificado al sistema nacional argentino actualmente en uso en la provincia del Neuquén: POSGAR 94, sistema de coordenadas cartográficas Gauss Krüger (zona 2) y a la resolución espacial horizontal de 496 m.

Bandas		Longitud de onda (nm)	Resolución espacial (m)
1	Azul	450 – 520	30
2	Verde	530 – 610	30
3	Rojo	630 – 690	30
4	infrarrojo cercano (NIR)	780 – 900	30
5	infrarrojo de onda corta (SWIR)	1550 – 1750	30
6	infrarrojo térmico (IR)	104000 – 12500	120
7	infrarrojo de onda corta (SWIR)	2090 – 2350	30
8	Pancromática	520 – 900	15

Tabla 1: Bandas espectrales del sensor ETM+/Landsat7.

Descripción de cada clase	Z_0 asignado
Cursos de agua y lagunas	0,0001 m
Suelo desnudo	0,005 m
Vegetación arbustiva	0,03 m
Vegetación arbórea	0,05 m

Tabla 2: Definición del esquema de clasificación y rugosidad aerodinámica superficial (z_0) asignada a cada tipo de cobertura del suelo.

En la Figura 5 se muestra el mapa digital en el que se aprecia que el mayor porcentaje de la superficie tiene muy baja rugosidad y que no se detectaron píxeles correspondientes a cursos de agua y lagunas.

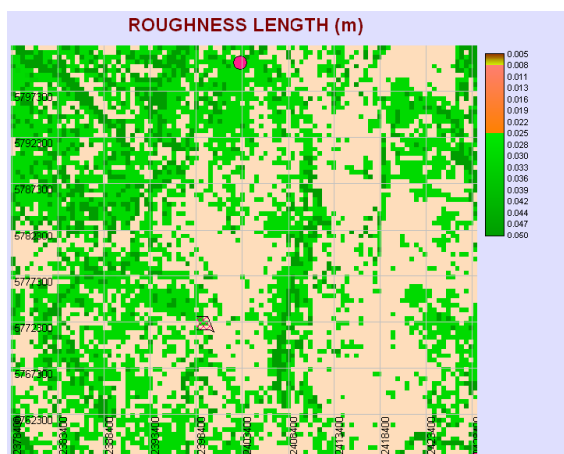


Figura 5: Mapa de la longitud de rugosidad aerodinámica superficial, z_0 . Proyección conforme Gauss Krüger. Se demarcan las estaciones de medición de Chorríaca al norte (centro borde superior) y Quili Malal al sur (extremo inferior derecho). El sitio de instalación de la antena se marcó con el polígono en la parte central de la imagen.

Topografía

La planialtimetría del dominio de estudio se obtuvo del United State Geological Survey (USGS). Los datos de elevación del terreno provienen de observaciones efectuadas con dos radares abordo del trasbordador espacial Space Shuttle Endeavour en Feb/2.000 y constituyen la base de datos Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). La elevación es recibida en puntos de grilla en el sistema de coordenadas cartográficas Universal Transverse Mercator, Zona 19 Sur. Estos datos tienen 90 m (3 segundos de arco) de resolución espacial horizontal, 20 m de error en ambas direcciones horizontales y 16 m de error en la vertical. Los datos fueron rectificadas al sistema nacional argentino actualmente en uso en la provincia del Neuquén: POSGAR 94, sistema de coordenadas cartográficas Gauss Krüger (zona 2) y a la resolución espacial horizontal de 496 m. El resultado se muestra en la Figura 6.

La altura mínima es 568 m, se encuentra ubicada en el valle del río Agrío en el sudeste de la región y la máxima es 1.770 m correspondiente al Cerro Mocho ubicado al oeste. El sitio de instalación de la antena tiene elevaciones que varían entre 792,5 m y 848,1 m.

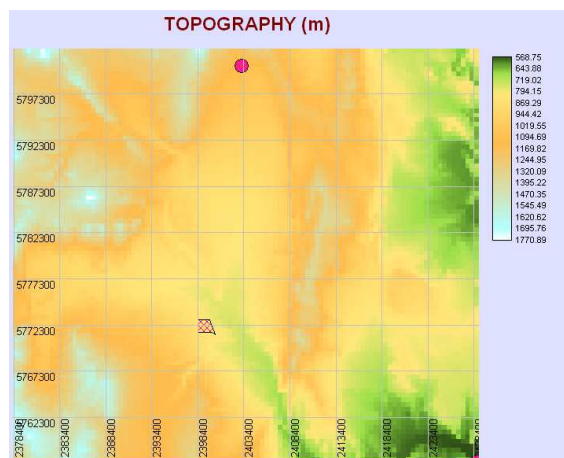


Figura 6: Mapa digital de elevación. Proyección conforme Gauss Krüger. Ver referencias en la Figura 5.

2.4 Preparación para la ejecución

El programa usado tiene una secuencia ordenada de ingreso de datos. En primer lugar se deben cargar, por separado, los mapas de topografía y de rugosidad. Luego, se ingresan los datos de viento, primero de superficie y luego de altura y por último, los datos de la capa límite atmosférica. Respecto de los datos de viento se fijó un intervalo de clase para la dirección del viento de 30° , de este modo, los cálculos se determinarán en 12 sectores de dirección.

Dado que el modelo trabaja por sector direccional se necesita identificar la rosa de los vientos que éste utilizará para caracterizar a la tres bases de datos ingresadas. A este procedimiento se lo denomina fijar la *estación de referencia*. En este trabajo hemos elegido a la rosa de frecuencias de Chorriaca a 10 m de altura como la de *referencia* porque representa las características que tienen los vientos tanto de superficie como de la atmósfera superior. Si hubiera diferencias apreciables en la dirección de los vientos dominantes el programa permite ingresar un ángulo de rotación para compensar los efectos locales del terreno, en este trabajo no se ha ingresado ninguna rotación.

Una de las consecuencias de utilizar una sola rosa de frecuencias es que la velocidad media anual de cada estación calculada con el programa, *velocidad efectiva*, puede no coincidir con la velocidad media medida en las estaciones que no son las de *referencia*. Este efecto debe ser examinado. En la Tabla 3 se muestran las velocidades medias por dirección del viento verdaderamente medidas y las que utilizará el programa. Las diferencias entre la velocidad medida y la *efectiva* son inferiores a 7,5 % excepto en Chorriaca a 30 m sns entre las direcciones 30° a 150° , sin embargo, estas direcciones tienen baja frecuencia anual de ocurrencia. La diferencia porcentual en el valor medio anual (todas las direcciones) es 5,0 % y 6,2 % en Chorriaca a 30 m y en Quili Malal a 10 m, respectivamente. Por lo tanto, la aproximación y restricción del uso de la *estación de referencia* dentro del programa se considera aceptable.

Dirección ($^\circ$)	Chorriaca 10 m		Chorriaca 30 m		Quili Malal 10 m	
	Vel. Medida (m/s)	Vel. Efectiva (m/s)	Vel. Medida (m/s)	Vel. Efectiva (m/s)	Vel. Medida (m/s)	Vel. Efectiva (m/s)
0	3,494	3,49	3,394	3,51	2,428	2,43
30	3,995	4,00	3,84	4,49	1,723	1,72
60	4,105	4,11	4,063	5,21	2,120	2,12
90	3,271	3,27	3,661	5,18	2,543	2,54
120	2,323	2,32	2,725	3,43	3,016	3,02
150	2,263	2,26	2,401	2,58	2,614	2,61
180	2,654	2,66	2,508	2,52	2,093	2,09
210	4,852	4,85	4,857	4,82	2,287	2,29
240	9,181	9,18	9,354	9,32	5,475	5,47
270	10,471	10,47	11,191	11,25	3,485	3,48
300	7,428	7,43	7,930	8,01	6,751	6,75
330	4,338	4,34	4,350	4,41	4,289	4,29
Todas	6,443	6,443	6,616	6,949	3,984	3,738

Tabla 3: Velocidades medias anuales medida y *efectiva* utilizada por el programa, en función de la dirección del viento.

Debido a las características topográficas de la zona se configuró la geometría de la grilla con 30 niveles verticales, cada uno tiene una separación que es una proporción de la capa inmediata inferior, como resultado se obtienen mayor cantidad de niveles cerca del suelo. El espesor total de la malla se lo igualó a 2.494 m que es dos veces la del terreno (elevación mayor menos elevación menor).

El campo inicial del viento surge de un promedio ponderado de los datos de superficie con una función del tipo de la inversa de un radio al cuadrado ($1/r^2$). Para la ponderación se fijó un radio de influencia de cada medición de 500 metros. Todos los datos de superficie fueron utilizados para la inicialización.

El número máximo de iteraciones se fijó en 10.000 pero los resultados se encontraron en menos de 343 iteraciones. El máximo residuo con el que finaliza el proceso iterativo se fijó en $1,00E^{-5}$. En cada iteración el modelo ajusta el campo de viento de tal forma que la velocidad en cada estación tenga una diferencia de hasta 2 % (tolerancia) con respecto a los datos de superficie medidos; además, se configuró al modelo para que realice un proceso de optimización en el que se repiten las ejecuciones dentro de la iteración principal. En cada repetición se calcula el error raíz cuadrada media (RMSE: root-mean-square error) entre la velocidad resultante y la medida y se compara con el RMSE de la repetición anterior, cuando esa diferencia entre repeticiones (toma 3 loops) es menor al 2% continúa con la próxima iteración. De esta forma se logra un mejor concordancia con los datos medidos.

Se solicitó al programa que calcule el campo de viento final a 10 m, 30 m y 50 m sns dado el tamaño vertical de la antena de espacio profundo.

2.5 Verificación del ajuste

Una vez obtenidos los resultados, el análisis del ajuste logrado por el modelo se realiza a través del cálculo del error absoluto porcentual con la finalidad de tener en cuenta el peso del error respecto al valor de la variable medida. Para su cálculo se consideran solamente los valores medios anuales, es decir, teniendo en cuenta todas las direcciones del viento. Para ello, se tomaron dos grupos: (a) toda la muestra de datos ($V \geq 0$ m/s) y (b) excluyendo las calmas ($V > 0,4$ m/s) y se utiliza la siguiente expresión:

$$Error \% = \frac{100 | (V_{calculada} - V_{medida}) |}{V_{medida}} \quad (6)$$

También se confeccionó un diagrama de dispersión y se calculó el coeficiente de correlación lineal, R^2 , entre las velocidades medidas y las estimadas con el modelo en cada una de las estaciones de medición y por dirección del viento.

3 RESULTADOS

En la Figura 7 se presenta el campo de vientos a 30 m sns, los mapas generados a 10 m y 50 m sns no se muestran dada las similitudes en las posiciones de los máximos y mínimos de velocidad. El rango de velocidades estimadas a 10 m de altura varían entre 3,3 m/s y 9,7 m/s, a 30 m varían entre 4,0 m/s y 10,6 m/s y en el de 50 m entre 4,3 m/s y 11,1 m/s.

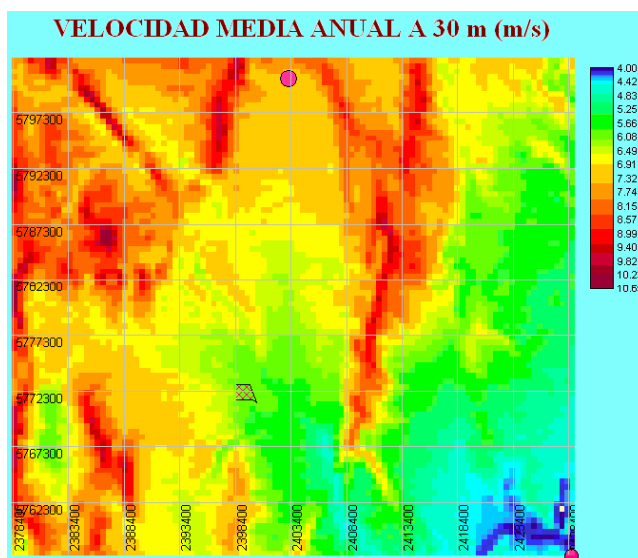


Figura 7: Campo estimado por el programa de la velocidad media anual del viento (m/s) a 30 m sns. El punto superior central corresponde a la ubicación de Chorriaca, el punto en el borde inferior derecho a Quili Malal, y el polígono central a DSA.

En la Tabla I se muestra el grado de ajuste de los resultados obtenidos comparados con las velocidades medidas. La Figura 8 muestra el grado de ajuste logrado por el modelo en cada una de las series de viento analizadas por rumbo.

		Chorriaca 10 m		Quili Malal 10 m		Chorriaca 30 m	
		Medido	Calculado	Medido	Calculado	Medido	Calculado
Velocidad (m/s)	$v \geq 0$ m/s	6,47	6,12	3,98	3,72	6,60	7,35
	$v > 0,4$ m/s	6,59	6,70	4,29	3,80	7,05	8,10
Error (%)	$v \geq 0$ m/s	-5,4		-6,5		+11,3	
	$v > 0,4$ m/s	+1,7		-11,4		+14,8	

Tabla 4: Velocidad media anual (todas las direcciones) medidas y estimadas; y error porcentual cometido en la estimación efectuada por el modelo.

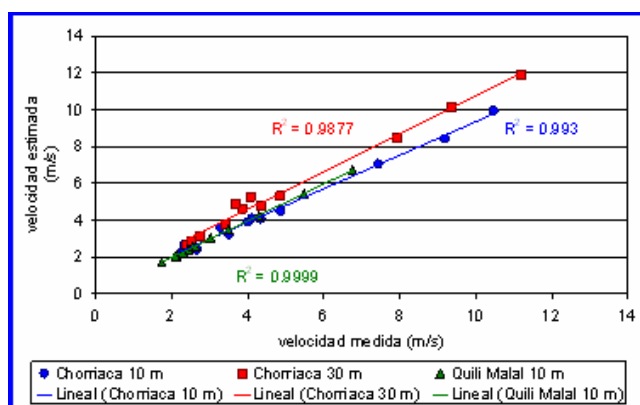


Figura 8: Dispersión entre las velocidades medidas y las estimadas en cada una de las estaciones de medición y por dirección del viento. Se incluye el coeficiente de correlación R^2 .

Seguidamente, se presentan los productos obtenidos con el modelo del área de emplazamiento de la antena, los cálculos se han efectuado a tres niveles: 10 m, 30 m y 50 m,

pero por razones de espacio se muestra en este trabajo los resultados de un nivel.

Se establecieron 12 puntos de control en el sitio estudiado distantes 496 m.

La velocidad media anual en el predio de instalación de la antena varía entre 4,9 m/s y 5,3 m/s a 10 m de altura, entre 5,9 m/s y 6,2 m/s a 30 m (Figura 9), y entre 6,4 m/s y 6,6 m/s a 50 m.

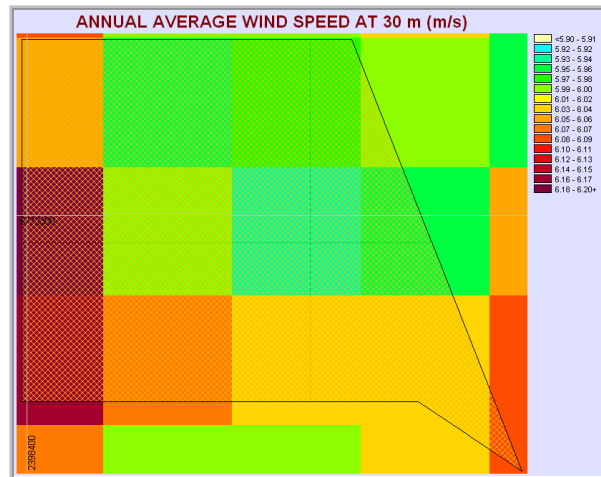


Figura 9: Distribución de la velocidad media anual del viento a 30 m sns en el sitio de instalación de la antena. Se han magnificado las diferencias de velocidad entre píxeles. La resolución espacial es 496 m.

La Figura 10 corresponde a la distribución de frecuencias de las direcciones del viento en el área de instalación de la antena entre 10 y 50 m de altura. Se observa que los vientos del Oeste (270°) son predominantes (22,6 %), luego los de los 240° y 300° (14,1 % y 13,0 %, respectivamente). La dirección más frecuente es también la de mayor intensidad del viento, como se aprecia en el Figura 11, donde el sector 270° tiene un valor medio anual de velocidad de 8,8 m/s a 10 m de altura, 10,4 m/s a 30 m y 11,1 m/s a 50 m sns. El sector con velocidad más débiles es el Sur (180°) que varía entre 2,0 m/s y 2,5 m/s entre 10 n y 50 m de altura sns.

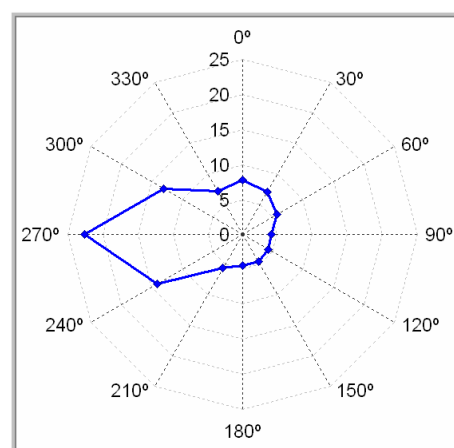


Figura 10: Distribución de frecuencias (%) de las direcciones del viento entre 10 y 50 m de altura.

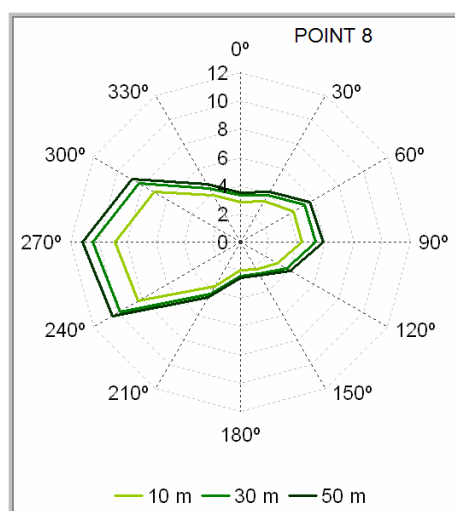


Figura 11: Distribución de la velocidad media anual (m/s) por dirección a 10 m, 30 m y 50 m sns en la posición de máxima velocidad (Punto 8) dentro del predio de instalación de DSA.

La Figura 12 muestra la función de densidad de probabilidad (fdp) media anual de la velocidad del viento (fdp de Weibull) a 30 m sns para los 12 puntos (Point 1 a 12) distribuidos dentro del predio en donde se instalará DSA, recordando que entre puntos hay una distancia de 496 m. La fdp de Weibull ajusta a la distribución de frecuencia anual de la velocidad del viento ($f(v)$):

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \quad (7)$$

donde v es la velocidad media del viento, c es el parámetro de escala y k es el parámetro de forma. Es válida para valores de v , k y $c > 0$. El parámetro k es un resultado del modelo, para estimar el parámetro de escala, c , se utilizó la siguiente expresión:

$$c = \bar{v} / \Gamma(1 + k^{-1}) \quad (8)$$

donde \bar{v} es la velocidad media anual del viento y $\Gamma()$ es la función Gamma.

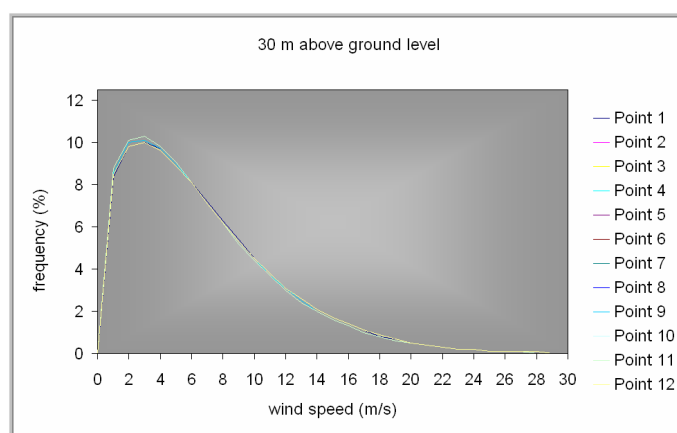


Figura 12: Función de densidad de probabilidad media anual a 30 m sns, en el área de instalación de DSA.

Las velocidades más frecuentes son 2 m/s, 3 m/s y 4 m/s a 10 m, 30 m y 50 m de altura respectivamente.

Las diferencias entre las fdp de los distintos puntos se deben a la influencia que tiene la topografía y la rugosidad sobre el viento.

Con los resultados del modelo es posible estimar las condiciones de vientos extremos que se establecen mediante el cálculo de la velocidad extrema anual que tiene períodos de retorno de 20, 50 y 100 años (límites de confianza de 95, 98 y 99%, respectivamente) y con la velocidad de ráfaga máxima anual que tiene un período de retorno de 50 años.

La velocidad extrema anual (intervalo promediado de 10 minutos) se calcula utilizando la función de densidad acumulada (fda: $F(V)$) de Fisher-Tippett tipo I o Gumbel (Ec. (9)) de los valores extremos anuales cuando el patrón de vientos del lugar se ajusta a una distribución de Weibull (Ec. (8)).

$$F(V) = \exp\{-\exp[-\alpha(V-U)]\} \quad (9)$$

donde V es la velocidad extrema del viento, α es el parámetro de escala y U es el parámetro de ubicación.

Se utiliza en este trabajo la metodología propuesta en la European Wind Turbine Standards II (EWTS II, 1998) desarrollada para evaluación del recurso eólico, en la cual la velocidad extrema en función del período de retorno se estima con la expresión:

$$\frac{V_r}{\bar{v}} = \frac{(\ln n)^k}{k \Gamma(1+k^{-1})} \left\{ k \ln n - \ln[-\ln(1-T_r^{-1})] \right\} \quad (10)$$

donde V_r es la velocidad extrema del viento que tiene un período de retorno de T_r años y n es el número de eventos independientes en un año. Los valores de \bar{v} y k corresponden a los resultados del modelo en la zona de ubicación de la antena. La Tabla 5 presenta las estimaciones efectuadas con períodos de retorno o recurrencia de 20, 50 y 100 años, a 10, 30 y 50 m de altura. Estos resultados corresponden a los valores más altos encontrados en las distintas posiciones dentro del predio de instalación de DSA.

	20 años	50 años	100 años
10 m	41,1	43,2	44,8
30 m	48,3	50,8	52,7
50 m	51,9	54,6	56,6

Tabla 5: Velocidad extrema anual (en m/s) estimada en el predio de la DSA con tres períodos de retorno a las tres altura.

La velocidad extrema anual o velocidad básica o ráfaga máxima (intervalo de promediado de 3 segundos) que tiene un período de retorno de 50 años (confianza 98%) se ha calculado en función de \bar{v} y k utilizando las recomendaciones de la Norma antes mencionada, según:

$$f(u_T | v) = (\sigma_T \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-0,5(u_T - v/\sigma_T)^2\right] \quad (11)$$

donde la velocidad media en un intervalo de tiempo corto (ráfaga: 3 segundos), T , es u_T . Se asume que u_T está normalmente distribuida alrededor del valor medio de 10 minutos, v , con desviación estándar σ_T . La fdp condicional de u_T dado v es $f(u_T|v)$.

La fda de u_T esta dada por:

$$F(u_T) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \{ N[u_T; v; \sigma_T(v)] W[v; c; k] dv du_T \} \quad (12)$$

donde $N[u_T; v, \sigma_T(v)]$ y $W[v; c, k]$ son respectivamente las notaciones de la distribución Normal y de la distribución de Weibull, y σ_T es la parte de la desviación estándar total que permanece después de haber aplicado un filtro paso bajo con un período T .

De éste análisis resultan los valores de ráfagas máximas en el sitio de estudio de 56,0 m/s a 10 m de altura; 65,0 m/s a 30 m y 70,0 m/s a 50m.

Para aplicaciones prácticas una herramienta muy utilizada para extrapolar la velocidad del viento en la vertical es la ley de la potencia que se expresa de la siguiente forma (Sutton, 1953):

$$u_2 = u_1 (h_2 / h_1)^p \quad (13)$$

donde u_1 (u_2) es la velocidad del viento a la altura h_1 (h_2) y p es el exponente que se toma constante con la altura para un cierto rango de alturas. El exponente p también es llamado coeficiente de la cortante del viento. Dado que se disponen de estimaciones a las alturas de 10 m, 30 m y 50 m, puesto que constituyen los resultados del modelo, p puede ser determinado de la forma:

$$p = [\ln(u_2 / u_1)] / [\ln(h_2 / h_1)] \quad (14)$$

donde u_1 (u_2) es la velocidad del viento a 10 m (50 m).

El valor más frecuentemente utilizado para p es 1/7 (0,143), sin embargo, p es muy dependiente de las características geofísicas y de estabilidad atmosférica locales.

En este trabajo la característica de la variación vertical de la velocidad del viento se establece mediante la estimación coeficiente de la cortante vertical o exponente de la ley de la potencia medio anual con los resultados de las velocidades del viento a 10 m y 50 m sns.

Los valores del exponente establecidos entre 10 y 50 m de altura en el sitio de instalación de la antena varían entre 0,133 y 0,177. En la Figura 13 se presentan en forma gráfica los perfiles verticales medios anuales de la velocidad del viento en diferentes posiciones dentro del predio. Los perfiles son parecidos pero no exactamente iguales en todo el predio. Las diferencias son producidas por efectos geofísicos.

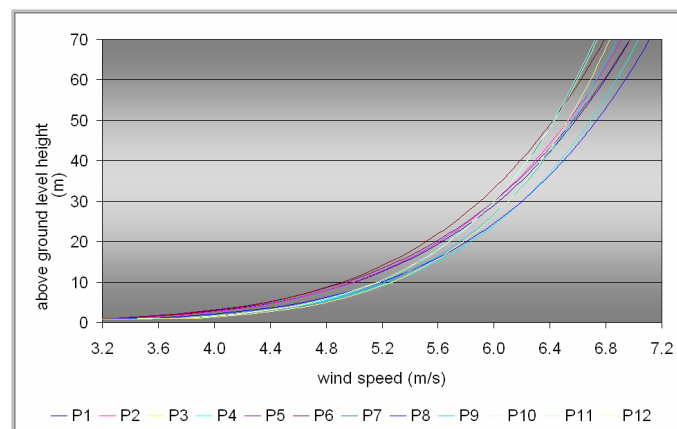


Figura 13: Perfiles verticales medios anuales de la velocidad del viento en distintas posiciones dentro del área de instalación de DSA.

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de la calidad del ajuste logrado entre los resultados alcanzados por el modelo en las posiciones y a las alturas correspondientes a las estaciones de medición y las propias mediciones efectuadas en Chorriaca y Quili Malal produjo coeficiente de correlación lineal (R^2) mayores a 0,98 en el análisis por dirección. Los errores cometidos en la estimación de la velocidad media anual (todas las direcciones) a 10 m de altura son bajos, las velocidades son subestimadas: -5,4 % en Chorriaca y -6,5 % en Quili Malal. Por el contrario, la velocidad es sobreestimada en Chorriaca a 30 m sns con 14,8 % de error. La propia medición del viento puede tener intrínsecamente una incertidumbre que puede alcanzar hasta de 10%. A 10 m de altura las diferencias de las velocidades medias anuales entre lo medido y lo calculado son 0,35 m/s y 0,26 m/s en Chorriaca y Quili Malal respectivamente, y a 30 m sns es 0,75 m/s en Chorriaca.

Por lo tanto, se concluye que las estimaciones son adecuadas y los errores cometidos se consideran aceptables.

La velocidad del viento media anual a 10m de altura sobre el nivel del suelo en el sitio de emplazamiento de DSA varía entre 4.9 y 5.5 m/s. Si solamente se considera la submuestra de velocidades mayores que 0.4 m/s, es decir, que se excluyen las calmas, la media anual varía entre 5.4 y 5.7 m/s. A 30m de altura la media anual de todos los casos de viento varía entre 5.9 y 6.2 m/s, y de la muestra sin calmas entre 6.5 y 6.7 m/s. A 50m de altura la velocidad media anual varía entre 6.4 y 6.6 m/s y sin considerar las calmas entre 6.9 y 7.2 m/s.

Las velocidades calculadas en el sitio de instalación de la antena parabólica concuerdan con las encontradas en el Mapa Eólico Provincial a pesar de la diferencia en la resolución espacial entre ambos, 496 m y 1200 m, respectivamente.

Se observa una relación directa entre la velocidad media anual y la elevación del terreno especialmente en los mapas de viento calculados en este trabajo aunque las variaciones son pequeñas.

Las fdp muestran de 2 m/s a 4 m/s son las velocidades más frecuentes, independientemente de la altura. Los Oestes, como era de esperar, son los de mayor ocurrencia anual (50 % entre 240° y 300°) y además los de mayor intensidad (8,8 m/s a 10, 5 m/s a 10 m y 50 m respectivamente).

Las velocidades extremas anuales, de intervalos de tiempo de 10 minutos, presentan los valores máximos de 43,2 m/s (54,6 m/s) a 10 m (50 m) sns, cuando se establece un período de retorno o de recurrencia de 50 años.

La velocidad de ráfaga extrema anual (intervalos de 3 segundos) o velocidad básica en diseño civil es 56,0 m/s (70,0 m/s) a 10 m (50 m) de altura, estimada con una recurrencia de 50 años.

La velocidad básica calculada a 10 m de altura es superior al que se muestra en la Figura 27 del reglamento del Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles 102 propuesto en 2001 (CIRSOC, 2001), que es aproximadamente 45,0 m/s. Sin embargo, en dichas normas se explicita que cuando el terreno tiene algún grado de complejidad se deben realizar estudios del sitio.

Los perfiles verticales de velocidad se ajustaron a una función potencial cuyo exponente varía un poco dependiendo de la ubicación dentro del sitio estudiado. Las diferencias son producidas por efectos geofísicos (topografía y rugosidad superficial).

Se han establecido 12 puntos de control a lo largo del predio y las estimaciones se han efectuado para cada uno de estos puntos. En todos los casos las variables de interés presentan poca diferencia entre los distintos puntos, sin embargo, es importante contar con esta

información para poder estimar en forma adecuada el arrastre, D , y los momentos, M , que soportarán la antena y toda la infraestructuras civil que se instalarán. Además, los datos obtenidos se utilizarán para diseñar los sistemas de control de la Deep Space Antenna Network de la China National Space Administration.

REFERENCIAS

- Brower M., WinMapTM fue desarrollado por Brower and Company, Andover, MA, USA, 1998.
- Chuvieco, E., Fundamentos de la teledetección espacial, Ediciones Rialp, Madrid, 453 pág., 1990.
- CIRSOC (Centro de Investigaciones de los Reglamentos nacionales de Seguridad para las Obras Civiles), Proyecto de Reglamento CIRSOC 102: Acción del Viento sobre las Construcciones, 2001.
- EWTS II (European Wind Turbine Standards II); Published by ECN Solar & Wind Energy, Petten, The Netherlands, 1998.
- Golder, D., Relations among stability parameters in the Surface layer. *Boundary Layer Meteorology* 3, 47-58, 1972.
- Holmes, J.D., *Wind Loading of Structures*, Spon Press, London, 2001.
- Hualpa, F. y Milani, F., Mapa Eólico de la Provincia de Mendoza, Informe Técnico Proyecto J-046, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, pp. 60, 2007.
- Lassig, J.L. y Palese, C., Mapa Eólico a 50 metros de altura en la zona norte de la Provincia del Neuquén. Actas XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones:Enief 2011, Rosario, Argentina, Nov/2011.
- Lässig, J.L., Cogliati, M.G., Bastanski, M.A. y Palese, C., Wind characteristics in Neuquén, North Patagonia, Argentina, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 183-199, 1999.
- Moreira, D. y Tirabassi, T., Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental, *Ambiente & Sociedade*, VII (2), 159-171, 2004.
- Palese C., Lassig, J.L., Cogliati M.G. y Bastanski, M.A., Wind regime and wind power in North Patagonia, Argentina. *Wind Engineering*, 24, 5, 361-377, 2000.
- Pasquill, F., The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteor. Mag.* 90, 33-49, 1961.
- Pedro, G., Palese, C., Lassig, J., y Mattio, H., Mapa eólico de la Provincia del Neuquén, *Revista HIDRORED Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*, 2, 03-11; ISSN: 0935-0578, 2006.
- Rohatgi, J. y Vaughn, N., *Wind Characteristics: An analysis for the generation of wind power*, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 239págs. ISBN-100808714783, 1994.
- Spera, D.A. (editor), *Wind Turbine Technology*, ASME Press, New York, 393 pág., 1994.
- Stull, R., *An introduction on boundary-layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pág., 1988.
- Sutton, O.G., *Micrometeorology*. Mc Graw Hill, New York, 1953.
- Turner D.B., A diffusion stability model for an urban area. *Journal of Applied Meteorology*., N° 3, 83-91, 1964.
- Wyatt, T.A., The aerodynamics of shallow paraboloid antennas. *Annals New York Academy of Sciences*, 222-238, 1964.