

Velocidad básica del viento para diseño estructural resistente a huracanes en San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Para ser usada según lo establecido en el código ASCE 7-16 en sus capítulos 26 a 30.

Gabriel Bernal^{1,2*}, Omar Darío Cardona^{1,3}, Claudia Villegas¹

1 INGENIAR CAD/CAE Ltd. (www.ingeniar-risk.com)

2. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá

3. Instituto de Estudios Ambientales. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales

* gabernal@ingeniar-risk.com

Introducción

A raíz del desastre ocurrido en el Departamento de San Andrés y Providencia por el paso del huracán Iota en noviembre de 2020, se procedió a la actualización de los valores de velocidad básica del viento para diseño estructural, a la luz de las provisiones dadas en el reglamento ASCE 7-16. Los valores de velocidad básica del viento aquí presentados deben ser los mínimos empleados en las labores de reconstrucción en San Andrés, Providencia, Santa Catalina, y demás territorios afectados del Archipiélago.

Velocidad básica del viento para diseño estructural

Los valores de velocidad básica del viento para diseño estructural aquí presentados deben ser usados dentro de los requisitos dados por la norma ASCE 7-16 de la American Society of Civil Engineers, en sus capítulos 26 a 30. Los valores calculados se obtuvieron de la simulación del tránsito de huracanes por la región Caribe aledaña al Archipiélago, incorporando los efectos del Cambio Climático, para ráfagas de 3 segundos de duración a 10 metros sobre la superficie del terreno considerando una categoría de exposición C (ver el Anexo 1 para mayores detalles). La categoría de exposición C está definida en ASCE 7-16 sección 26.7.3. Se obtuvieron valores de velocidad básica del viento de diseño para las cuatro categorías de Riesgo definidas en el ASCE 7-16, las cuales se presentan para información en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías de riesgo (Transcrito de ASCE 7-16 Tabla 1.5-1).

Uso u ocupación de edificaciones y estructuras	Categoría de Riesgo
Edificios y otras estructuras cuyo colapso representa un bajo riesgo para la vida humana.	I
Todos los edificios y otras estructuras excepto los indicados en las categorías I, III y IV.	II
Edificios y otras estructuras cuyo colapso representa un alto riesgo para la vida humana.	III
Edificios y otras estructuras definidos como esenciales.	IV

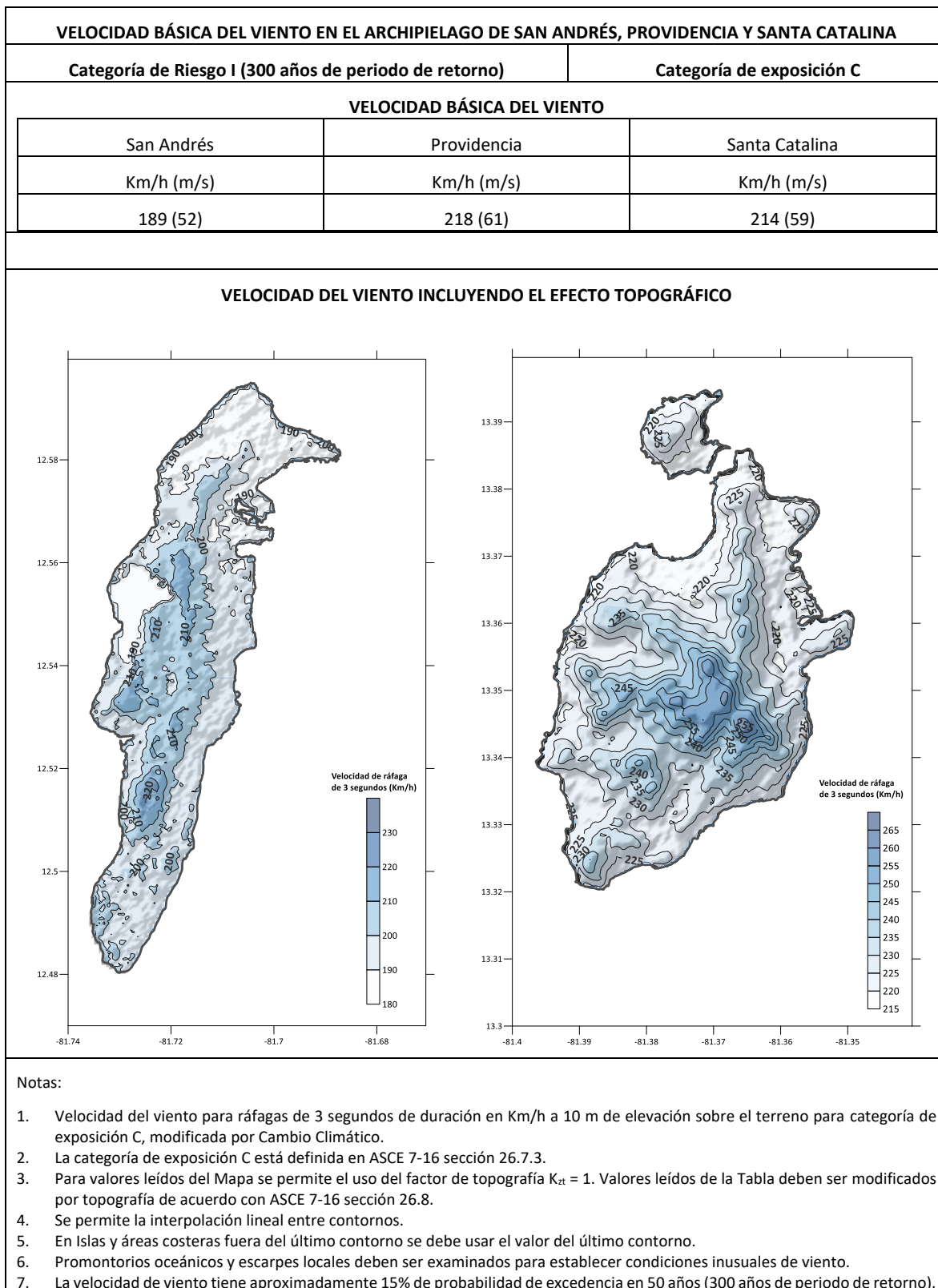


Figura 1. Velocidades básicas de diseño para categoría de riesgo I.

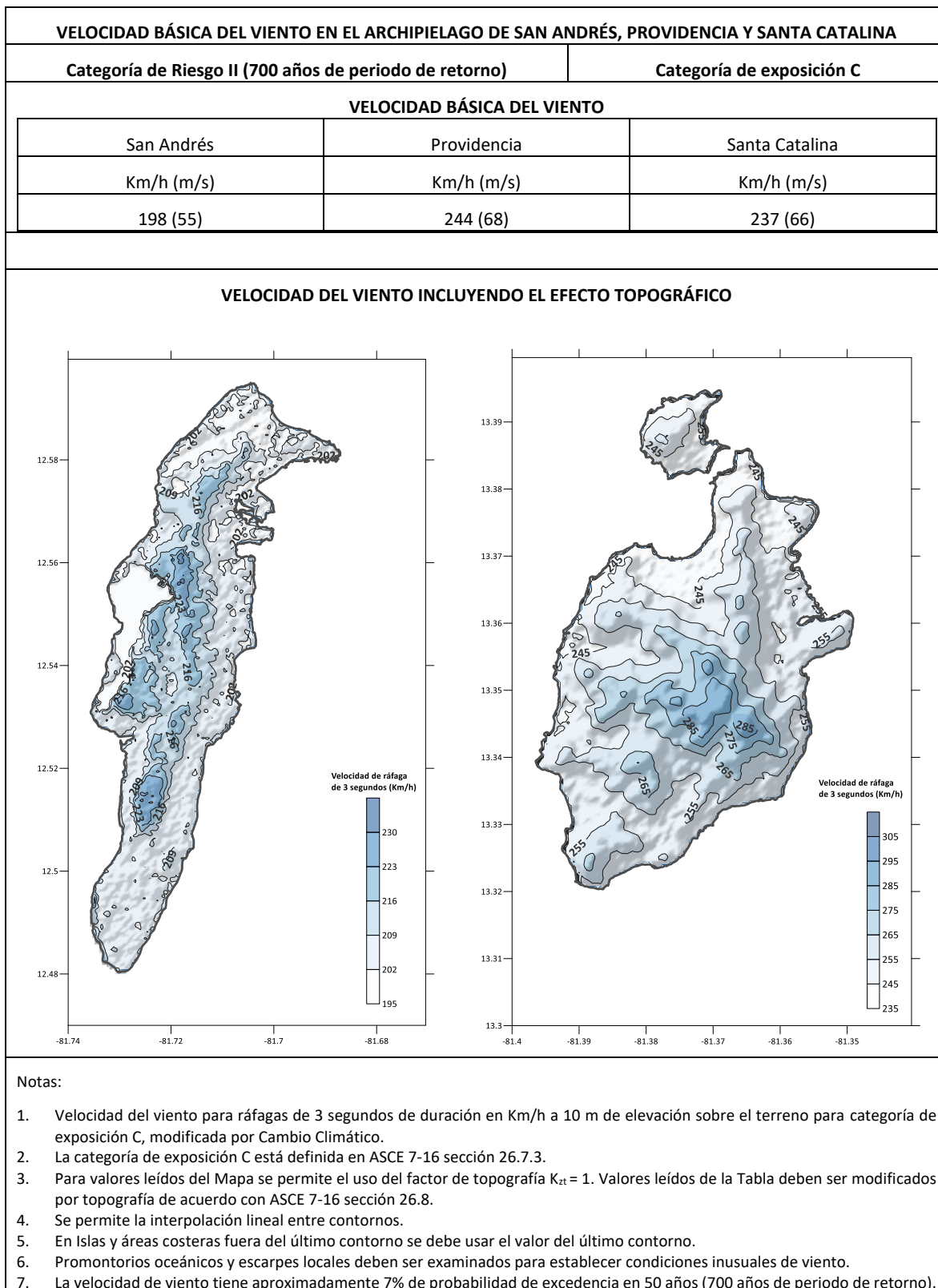


Figura 2. Velocidades básicas de diseño para categoría de riesgo II.

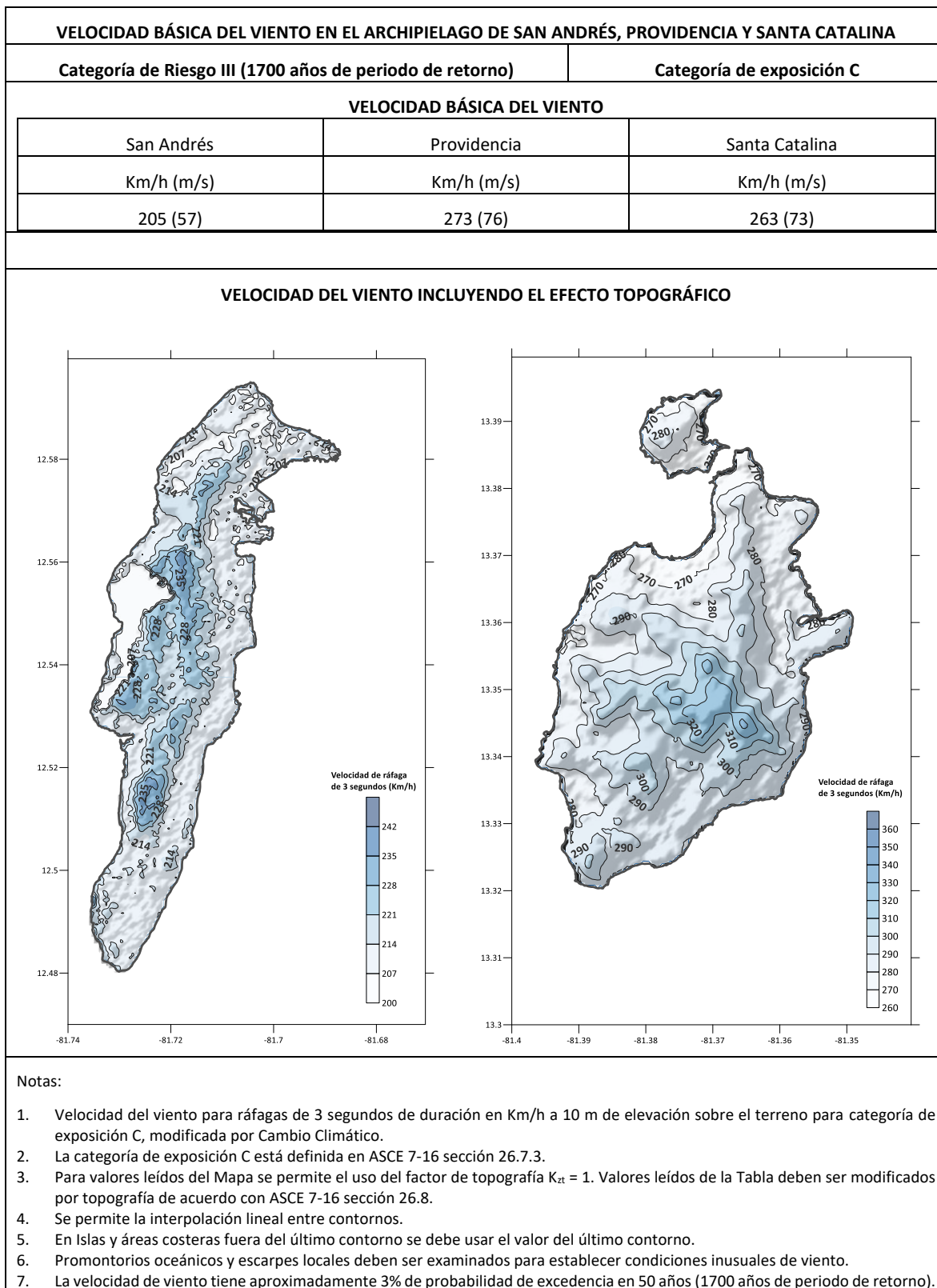


Figura 3. Velocidades básicas de diseño para categoría de riesgo III.

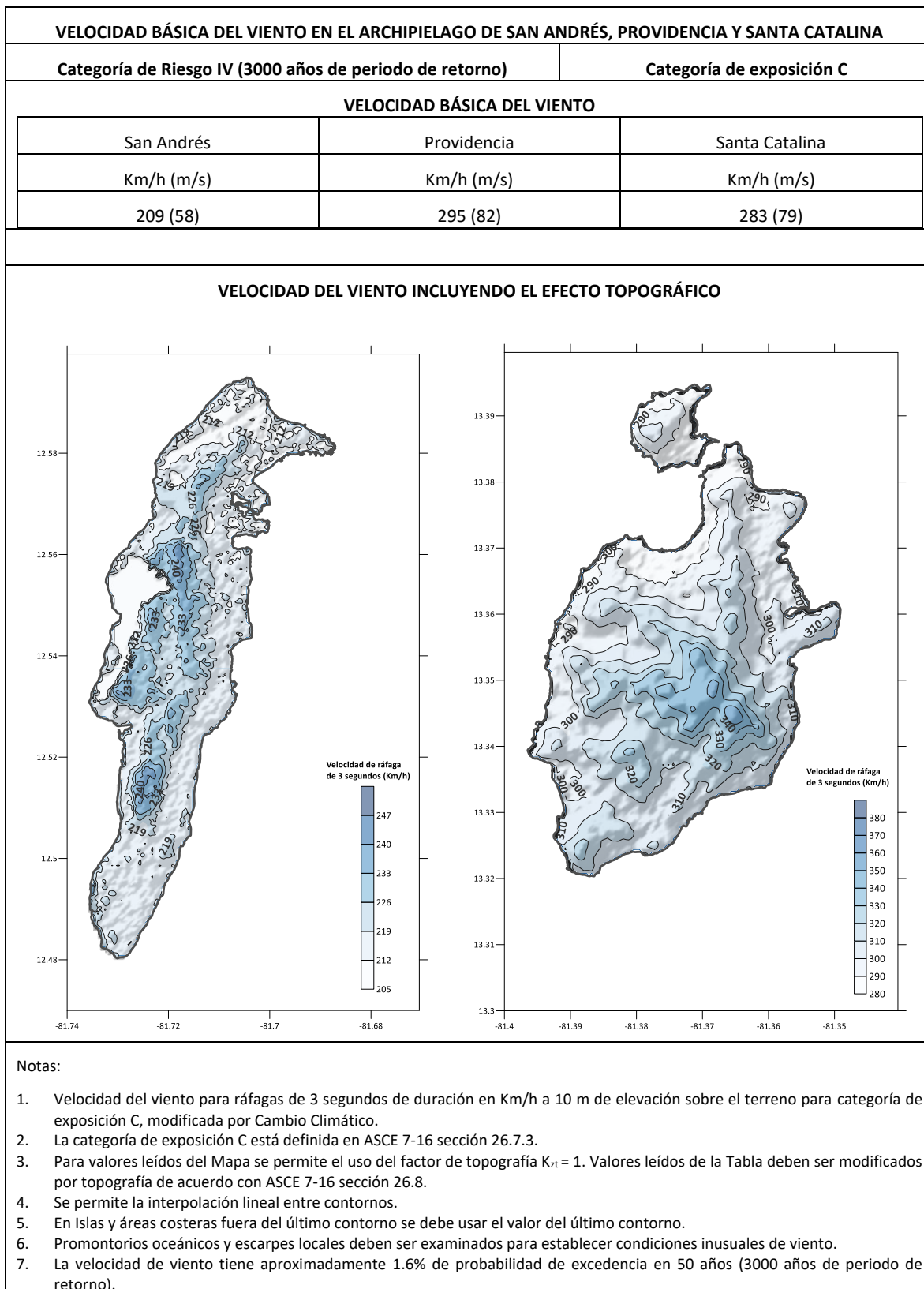


Figura 4. Velocidades básicas de diseño para categoría de riesgo IV.

Anexo 1: Modelo de cálculo de velocidades de viento por huracanes en San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Introducción

El 13 de noviembre de 2020 se forma al noreste de Colombia la tormenta tropical Iota, siendo clasificada como Huracán Categoría 1 el 15 de noviembre por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos, llegando a ser Categoría 4 tan solo un día después, momento en el cual impacta con mayor fuerza el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, causando velocidades de viento sostenidas en 3 segundos del orden de 320 Km/h¹ y destrucción sin precedentes en la historia del país, especialmente en la isla de Providencia.

La Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR 10), en su Título B, Figura B.6.4-1, establece una velocidad básica del viento para diseño estructural en San Andrés, Providencia y Santa Catalina de 36 m/s (130 km/h), correspondiente con la región 5 de amenaza eólica.

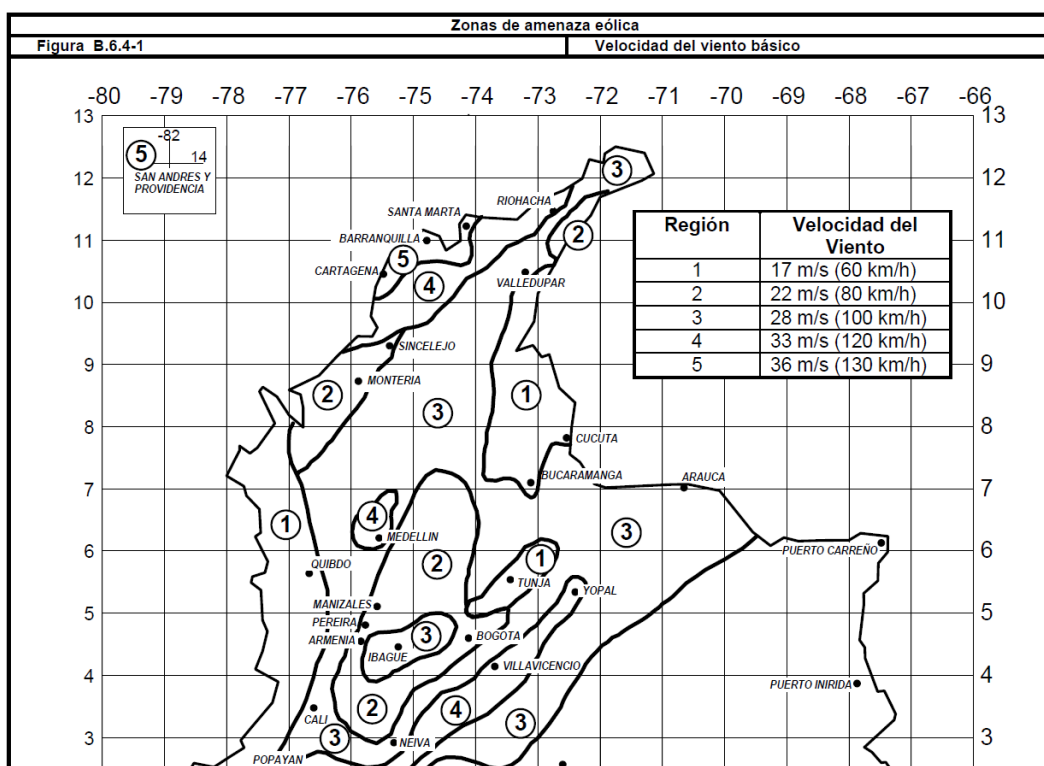


Figura A 1. Mapa de zonificación eólica de Colombia incluido en el reglamento NSR 10

¹ La velocidad de viento reportada en los boletines meteorológicos de huracanes es promediada en 1 minuto, variable con la cual se establece la Categoría Saffir-Simpson del ciclón. En el momento en que Iota impacta el Archipiélago siendo ciclón Categoría 4, presenta velocidades máximas sostenidas en un minuto de alrededor de 250 Km/h, lo que corresponde a velocidades de ráfaga de 3 segundos de alrededor de 320 Km/h.

Dado que el reglamento NSR 10 subestima de manera importante las velocidades de viento que pueden presentarse debido al tránsito de huracanes cerca del Archipiélago, se procedió a la actualización de las velocidades básicas del viento para diseño estructural, a la luz de los requerimientos dados en el reglamento ASCE 7-16 de la American Society of Civil Engineers, cuyas provisiones son usadas en los códigos de construcción de la mayoría de países con costas en el Mar Caribe (e.g. Florida Building Code , Caribbean Unified Building Code, International Building Code).

Para la evaluación de la velocidad básica de diseño estructural en San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se siguió un enfoque metodológico basado en la simulación de trayectorias de huracanes. Esta metodología es ampliamente aceptada a nivel internacional para determinar valores para el diseño de edificaciones e infraestructura y la estimación de pérdidas para establecer primas de seguros (Vickery et al., 2009a).

Una evaluación basada en eventos se utiliza para crear un conjunto de huracanes estocásticos, totalmente compatibles con las características físicas de los ciclones observados en la historia, pero que no necesariamente han ocurrido aún. La intensidad de cálculo para el campo de viento fuerte es la velocidad de ráfagas de 3 segundos a 10 metros de la superficie (v_{10}). Para cada evento se calcula el campo de viento correspondiente en todo el territorio de análisis, expresado como la distribución de probabilidad de v_{10} . Todos los cálculos fueron realizados en el software TCHM (Bernal, 2013).

Trayectorias históricas en la región aledaña al Archipiélago

Las trayectorias de los huracanes se componen de avisos, los cuales se dan cada 6 horas e indican: fecha y hora del aviso, ubicación geográfica del centro del ciclón, presión central y velocidad del viento sostenida en 1 minuto a 10 metros sobre la superficie del mar. Estos avisos son usualmente emitidos por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos para toda la cuenca del Atlántico Norte. La Figura A 2 muestra la trayectoria, con sus diferentes avisos, del huracán Iota.

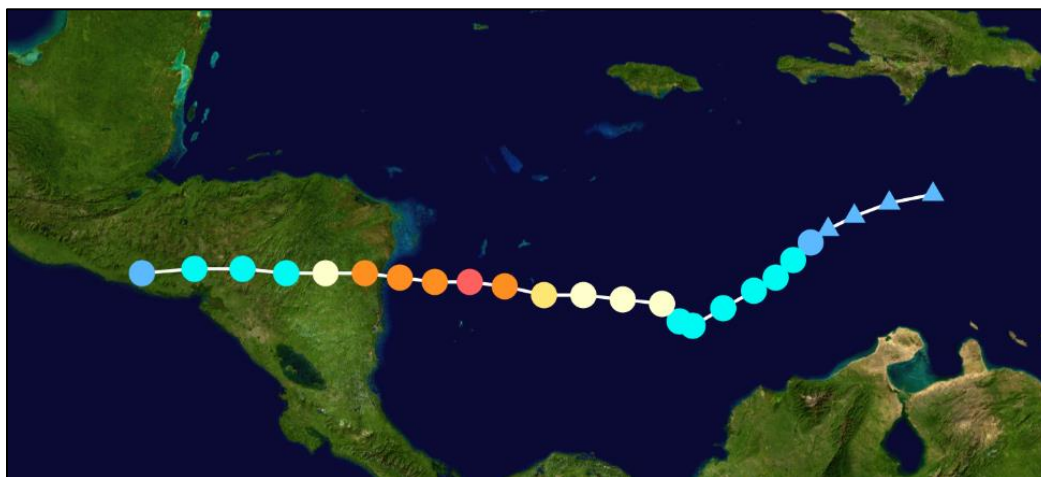


Figura A 2. Trayectoria y avisos del huracán Iota

Con el valor de presión central en cada aviso, o la velocidad sostenida en 1 minuto, se calcula la categoría Saffir-Simpson del huracán, presentada en la Tabla A.1. Con fines ilustrativos, se incluye en la Tabla A.1 la velocidad de ráfaga estimada en 3 segundos (no hace parte de la escala original).

Tabla A.1. Escala de huracanes Saffir-Simpson (DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta Tropical)

Categoría		Velocidad sostenida en 1 minuto (km/h)	Presión central (hPa)	Velocidad aproximada sostenida en 3 segundos (km/h)
▲	DT	<60	990-1000	<78
●	TT	60-120	980-990	78-156
●	1	120-150	970-980	156-195
●	2	150-180	965-970	195-234
●	3	180-210	945-965	234-273
●	4	210-250	920-945	273-325
●	5	>250	<920	>325

Las trayectorias históricas para esta evaluación fueron recuperadas de la base de datos IBTrACS², mantenida por la Agencia Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) de los Estados Unidos, y considerada la mejor fuente de información de trayectorias ciclónicas en el mundo. La Figura A 3 muestra la distribución de trayectorias, con sus correspondientes categorías Saffir-Simpson por segmento, en la región aledaña al Archipiélago.

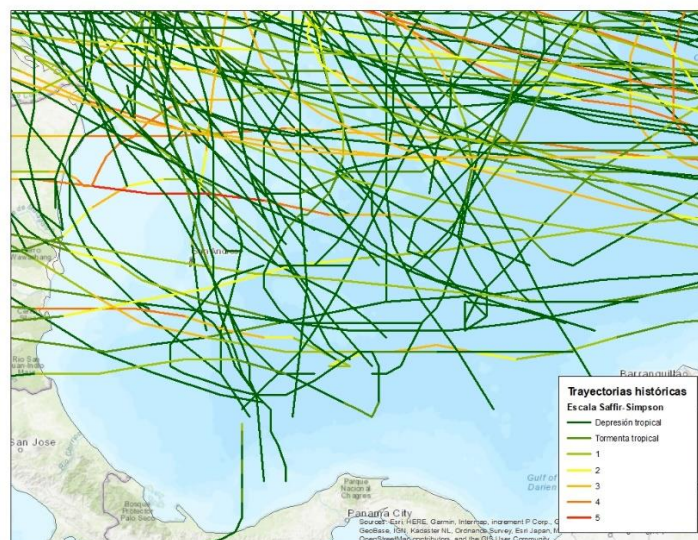


Figura A 3. Trayectorias históricas aledañas al Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

² International Best Track Archive for Climate Stewardship. <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>

Modelo de ocurrencia de ciclones históricos

Dentro de la evaluación de las velocidades del viento, se requiere definir un modelo de ocurrencia de huracanes en la cuenca oceánica completa, mediante el cual sea posible establecer la probabilidad de que se presente alguna trayectoria durante cualquier ventana de tiempo. La Figura A 4 muestra la acumulación total del número de tormentas con categoría mayor a 1 ocurridas en la cuenca del Atlántico Norte entre 1851 y 2020. Es posible ver que la tasa media de ocurrencia de huracanes en la cuenca oceánica es aproximadamente constante, lo cual permite definir la ocurrencia aleatoria de los huracanes en el tiempo por medio de un proceso homogéneo de Poisson (Bernal et.al. 2021). El parámetro λ del proceso de Poisson que describe la ocurrencia de huracanes en el Atlántico norte corresponde a la pendiente promedio del gráfico acumulado de número de huracanes.

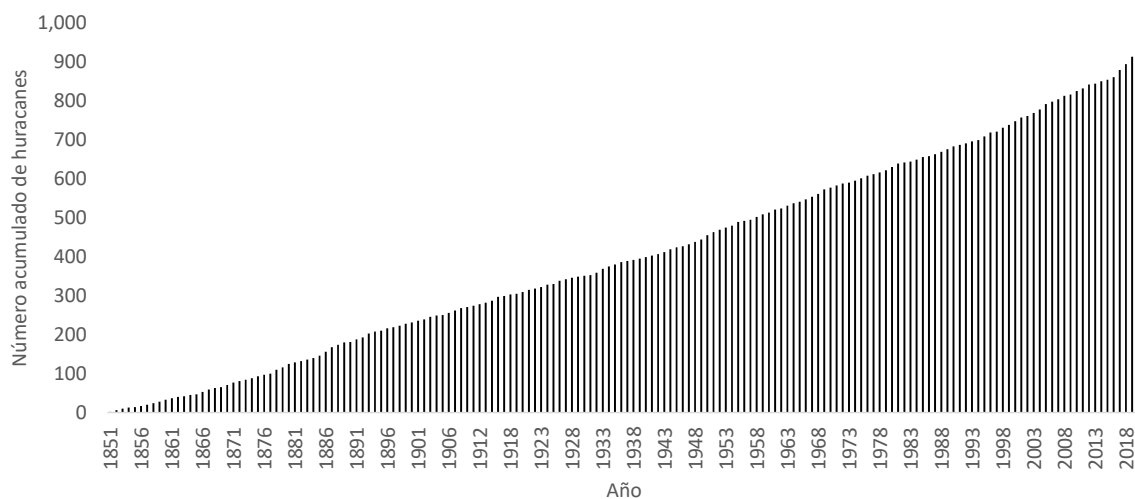


Figura A 4. Número acumulado de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte de 1851 a 2020

Trayectorias simuladas para clima futuro

Las condiciones del clima futuro fueron simuladas hasta 2055 por la Agencia Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de los Estados Unidos, por medio del modelo de circulación atmosférica global Community Climate System Model (CCSM), con una resolución espacial a nivel mundial de 36 Km y dos subdominios anidados con resolución de 12 y 4 kilómetros como se ilustra en la Figura A 5. Dentro de estos subdominios, se anida el modelo meteorológico Weather Research and Forecast (WRF), el cual permite simular condiciones meteorológicas de mesoescala.

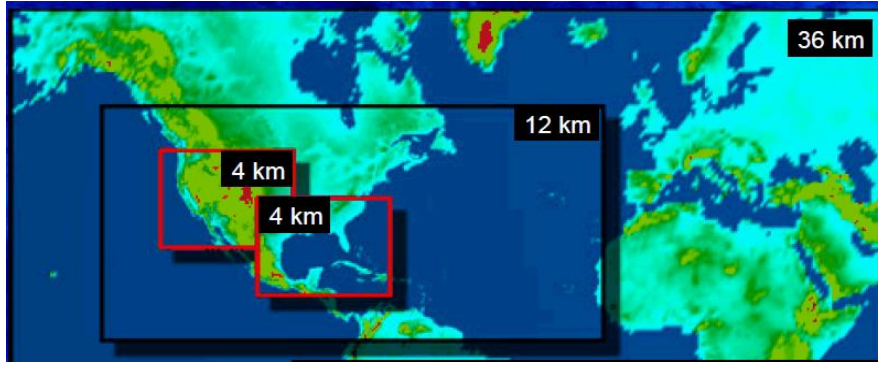


Figura A 5. Dominios espaciales y resoluciones del modelo CCSM-WRF de NCAR

Dentro de este sistema de simulación se imponen las condiciones dadas por las trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero y se simula la dinámica atmosférica influenciada por las emisiones, principalmente de CO₂. La Figura A 6 muestra una simulación del tiempo atmosférico el 10 de enero del 2046 obtenida con el modelo CCSM-WRF de NCAR.

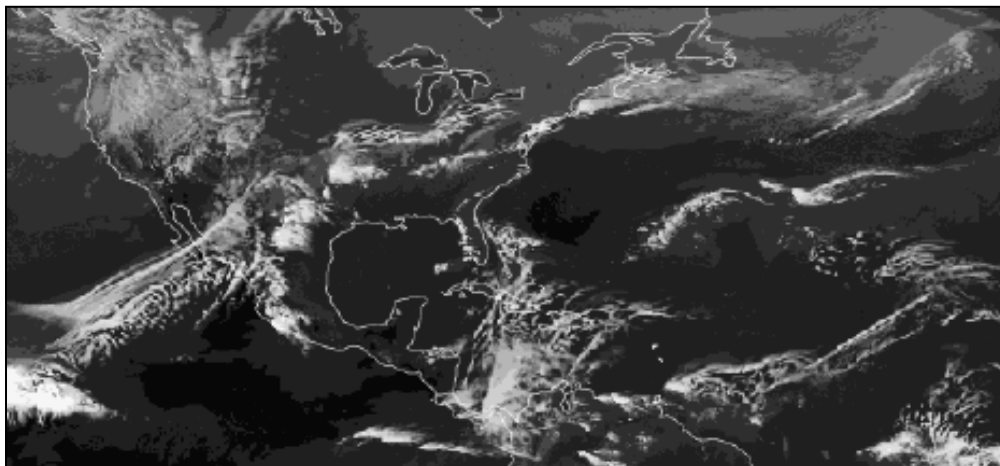


Figura A 6. tiempo atmosférico simulado para el 10 de enero de 2046

La simulación climática continua hasta el 2055 permitió a NCAR encontrar trayectorias de huracanes que responden a las condiciones impuestas por una mayor concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. La Figura A 7 muestra la distribución geográfica de trayectorias de huracanes en la región cercana al Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, combinando las trayectorias históricas (1851 a 2020) y las simuladas por NCAR (2021 a 2055).

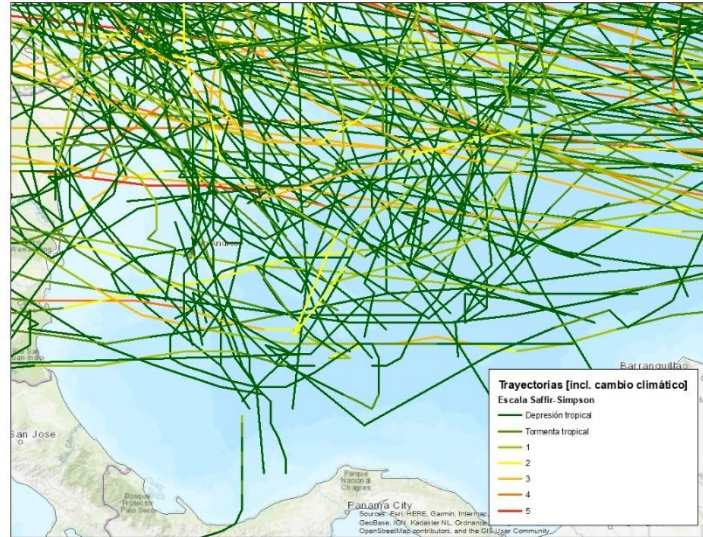


Figura A 7. Trayectorias históricas (1851-2020) y simuladas con Cambio Climático (2021-2055) aledañas al Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Modelo de ocurrencia de ciclones con Cambio Climático

En el caso de la evaluación con Cambio Climático, las trayectorias simuladas implican un cambio en el modelo matemático de ocurrencia de ciclones, no solo por considerarse una ventana de tiempo más grande (hasta 2055), sino por la influencia que el Cambio Climático tiene en la frecuencia de ocurrencia de huracanes. Al acumular los ciclones de la cuenca del Atlántico Norte desde 1851 hasta 2055, se ve una tasa de acumulación que no permanece constante (ver Figura A 8). Por lo tanto, la modelación de la ocurrencia de ciclones se realiza, en este caso, por medio de un proceso de Poisson no homogéneo, es decir, en el cual su parámetro o tasa depende del tiempo, $\lambda(t)$ (Bernal et.al. 2021).

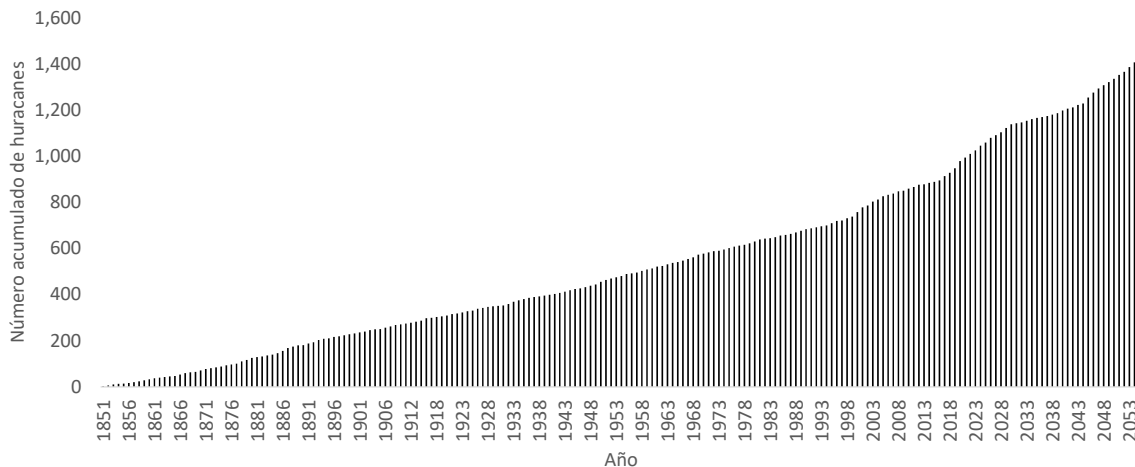


Figura A 8. Número acumulado de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte de 1851 a 2055

Perturbación de las trayectorias de los huracanes

Para cada huracán histórico, se genera un conjunto de trayectorias “hijas” siguiendo un proceso bidimensional de Wiener en el cual la trayectoria histórica es perturbada artificialmente para crear una nueva trayectoria hija. Este proceso de perturbación es presentado en la ecuación 1:

$$\mathbf{x}_s(t_{k+1}) = \mathbf{x}_s(t_k) + \Delta\mathbf{X}_{k,k+1} + e \quad 1$$

donde $\mathbf{x}_s(t_k)$ es el vector de posición de un punto de la trayectoria en el instante t_k , $\mathbf{x}_s(t_{k+1})$ es el vector de posición en el siguiente punto de la trayectoria registrado en el instante t_{k+1} , $\Delta\mathbf{X}_{k,k+1}$ es el delta entre el instante k y $k + 1$, y e es una variable aleatoria que sigue una distribución normal con $\mu=0.0$ y $\sigma=0.5$.

Los valores de presión central de las trayectorias simuladas se establecen inicialmente como iguales a los del huracán original, y luego son modificados de acuerdo con el modelo de balance propuesto por Emanuel (2006) considerando los parámetros del sistema atmosférico-oceánico que influyen en el ciclo de vida de un huracán, garantizando así la consistencia física de los valores simulados. Este procedimiento permite ampliar artificialmente el catálogo de huracanes en la región de cálculo, permitiendo así la simulación de trayectorias no ocurridas en el pasado. En esta evaluación, se simularon 100 trayectorias hijas por cada trayectoria histórica.

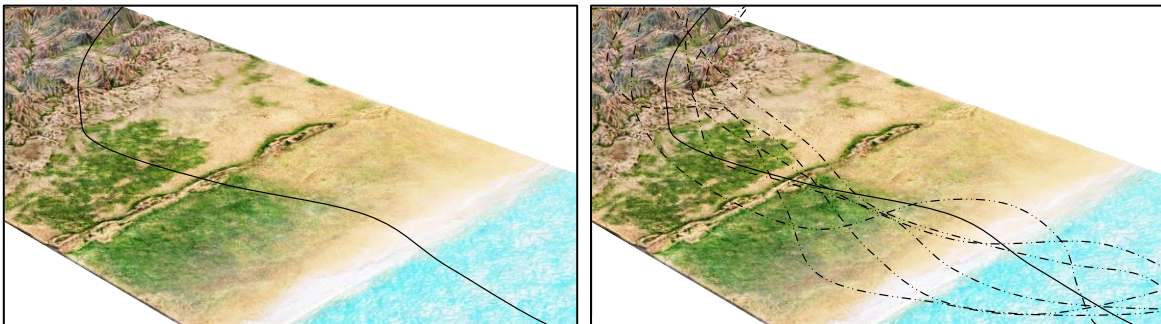


Figura A 9. Esquema de simulación de trayectorias sobre un territorio hipotético. De la trayectoria histórica (izq.) se obtiene una familia de trayectorias simuladas (der.)

Modelación del campo de viento

La modelación del campo de viento es un proceso de tres pasos (Vickery et al., 2009a):

1. A partir de la presión central del huracán, se calcula la velocidad del viento de gradiente. La velocidad gradiente es la velocidad que resulta de asumir que el principal mecanismo que causa las corrientes de viento es el gradiente de presión. Los efectos del rozamiento superficial, así como los efectos no lineales del rozamiento entre capas de aire son despreciados en este punto.
2. Por medio de un modelo de capa límite planetaria, se calcula el perfil de velocidades en función de la rugosidad de la superficie, y el valor básico de

velocidad de viento promediado en una hora a 10 metros de la superficie del terreno. En este punto, los efectos no lineales de rozamiento se incorporan como un campo de perturbación aleatorio en todo el dominio de evaluación.

3. La velocidad básica promediada en una hora es transformada a velocidad de ráfaga de 3 segundos mediante el cálculo del factor de ráfaga correspondiente. Así mismo, la velocidad resultante es modificada para incorporar el efecto de la topografía.

Campo de viento de gradiente

La velocidad del viento de gradiente (v_G) se calcula en este estudio utilizando el modelo propuesto por Holland (1980):

$$v_G = \sqrt{\left(\frac{RMW}{r}\right)^B \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^B\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2}} \quad 2$$

en donde RMW es la distancia a los máximos vientos, r es la distancia de observación (i.e. la distancia del sitio de cálculo al centro de la tormenta), ΔP es el gradiente de presión ($\Delta P = P_n - P_0$, donde P_n es la presión atmosférica nominal establecida como 1005 hPa), ρ es la densidad del aire, f es el parámetro de fuerza de Coriolis ($f = 2\Omega \sin\varphi$, donde Ω es la velocidad de rotación angular de La Tierra, y φ es la latitud del ojo del ciclón) y B es el parámetro adimensional de Holland, el cual es una constante que define la forma del perfil de velocidad gradiente y que toma valores usualmente entre 0.7 y 2.2.

El radio a los máximos vientos (RMW) marca el punto en el cual el perfil de velocidad gradiente es máximo, medido desde el centro del huracán. Existen múltiples propuestas en la literatura para el cálculo de este parámetro. En este estudio se aplica la ecuación empírica propuesta por Vickery & Whadhera (2008),

$$RMW = 3.015 - 6.291 \cdot 10^{-5} \Delta P + 0.0337 \varphi \quad 3$$

Para el cálculo del parámetro B de Holland, se emplea la formulación propuesta por Vickery & Wadhera (2008), quienes encontraron una correlación suficientemente buena entre B y un parámetro adimensional A definido por ellos:

$$B = 1.732 - 2.237 \sqrt{A} \quad 4$$

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e}\right)}} \quad 5$$

en donde R_d es la constante de gases del aire, T_s es la temperatura de superficie del mar (dada en °K), y e es la constante de Euler. La Figura A 10 muestra un campo de viento

calculado para un huracán estacionario (i.e. sin velocidad de avance), por medio del modelo de Holland (1980) aquí presentado. El perfil de velocidades que se muestra es simétrico, lo que resulta en un campo de viento con contornos circulares. La velocidad gradiente calculada corresponde a la velocidad sostenida en un tiempo muy largo, por lo que se asocia a un tiempo de una hora.

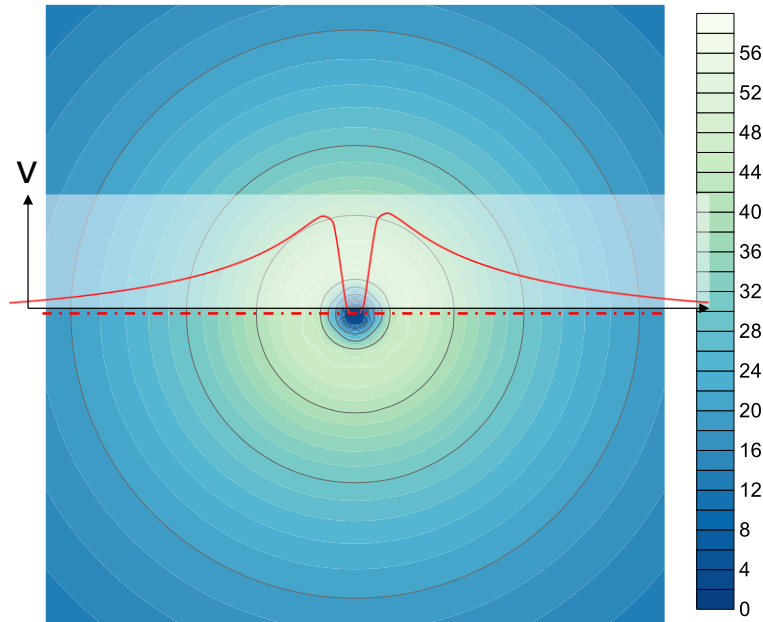


Figura A 10. Campo de velocidad gradiente de una tormenta estacionaria con presión central de 950 hPa. El perfil de velocidad presentado es calculado con el modelo de Holland (1980).

Velocidad superficial del viento

La velocidad de gradiente (v_G) es modificada para obtener la velocidad a nivel de superficie del terreno (en realidad a 10 metros sobre la superficie) utilizando un modelo de capa límite plantearía. Vickery et al. (2009b) proponen un modelo de variación de la velocidad media del viento (en una hora), $u(z)$ como función de la altura desde la superficie z , dentro de la capa límite como:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*} \right)^2 \right] \quad 6$$

en donde k el coeficiente de von-Karman ($k = 0.4$), u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica y H^* es la altura de la capa límite, la cual puede modelarse de acuerdo con Vickery et al. (2009b) así:

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \quad 7$$

en donde I es la estabilidad inercial, definida por Kepert (2001) como:

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r}\right) \left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r}\right)} \quad 8$$

La velocidad de fricción, u_* , se define como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad 9$$

en donde τ es el cortante superficial del viento, definido como:

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2 \quad 10$$

en donde C_d es el coeficiente de arrastre, y u es la velocidad del viento en superficie. La aplicación de este modelo de capa límite resulta en perfiles logarítmicos de variación de la velocidad sostenida en un minuto con la altura desde la superficie, los cuales han sido ampliamente validados con respecto a valores registrados en sondas de caída libre lanzadas sobre ciclones tropicales desde vuelos de reconocimiento (mayores detalles en Vickery et. al. 2009b). La Figura A 11 muestra tres perfiles de velocidad calculados para diferentes distancias desde el centro de un ciclón con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

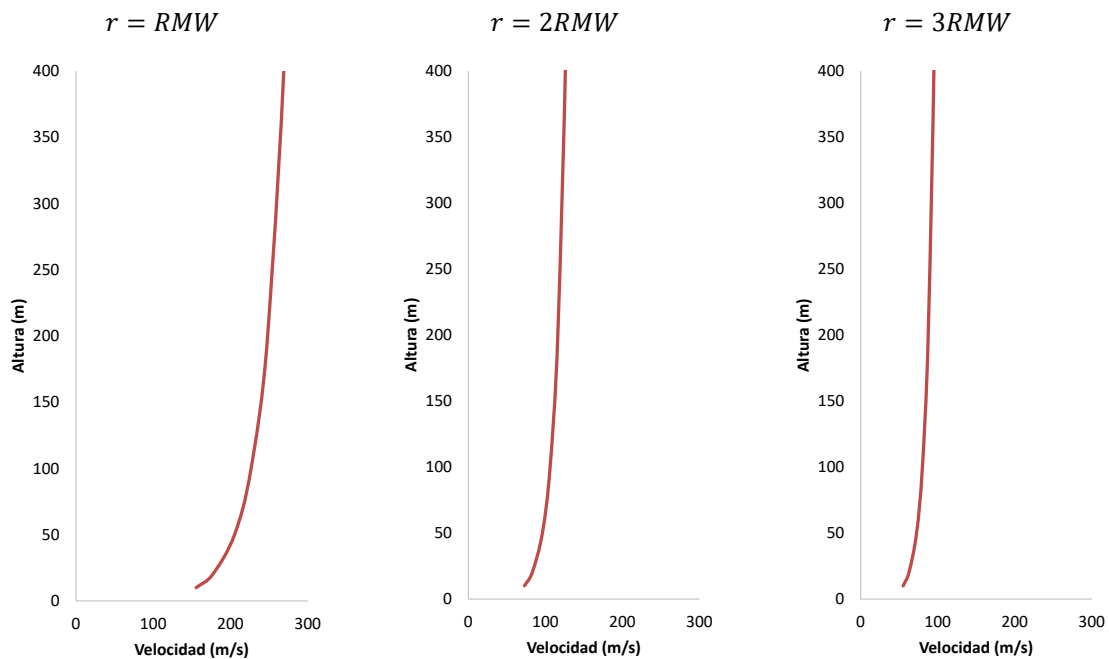


Figura A 11. Perfiles de velocidad logarítmicos calculado a diferentes distancias del centro de la tormenta para un huracán con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

Modificadores de sitio

Las condiciones locales modifican el valor de la velocidad del viento superficial en cada ubicación geográfica. Los principales modificadores son la rugosidad de la superficie y el efecto topográfico.

Rugosidad de la superficie

La rugosidad superficial está asociada con el tamaño y densidad de obstáculos al flujo de viento, los cuales inducen flujo turbulento a nivel local, reduciendo la magnitud de la velocidad superficial. La rugosidad de la superficie es directamente incorporada en el modelo de capa límite por medio de los parámetros z_0 (longitud de rugosidad aerodinámica) y C_d (coeficiente de arrastre), cuya modificación tiene un efecto en el perfil logarítmico del viento como se ilustra en la Figura A 12.

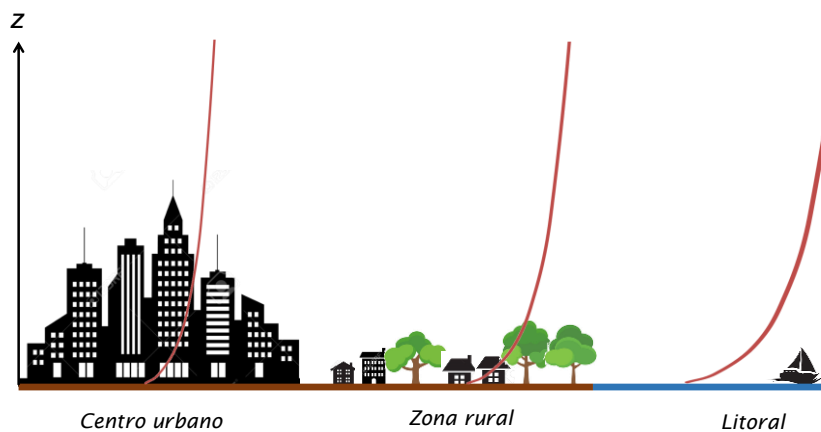


Figura A 12. Representación esquemática del cambio inducido en el perfil logarítmico del modelo de capa límite por cuenta de la rugosidad superficial.

Para el caso del cálculo de la velocidad básica de diseño en San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se consideró un tipo de exposición C, el cual se define formalmente en la sección 26.7.3 del reglamento ASCE 7-16, pero que puede interpretarse como una región de campo abierto, posiblemente con construcciones dispersas de menos de 30 m de altura. Si bien esta no es necesariamente la condición en todas partes de las islas del Archipiélago, se asumió como constante dado que es la condición base normativa. Para simular una exposición de categoría C, se usaron valores de $z_0 = 0.065$ m y $C_d = 0.006$.

Efecto topográfico

El efecto topográfico describe las modificaciones causadas a la velocidad superficial del viento por cuenta de la existencia de escarpes o promontorios. Este efecto cambia el carácter logarítmico del perfil de velocidad del modelo de capa límite. En la actualidad no existen aproximaciones analíticas cerradas para la modelación del perfil de velocidad de capa límite alterado por topografía. En la práctica, el efecto se determina por medio de la definición del factor de topografía K_{zt} el cual establece el valor por el cual se multiplica la velocidad superficial para incorporar el efecto topográfico.

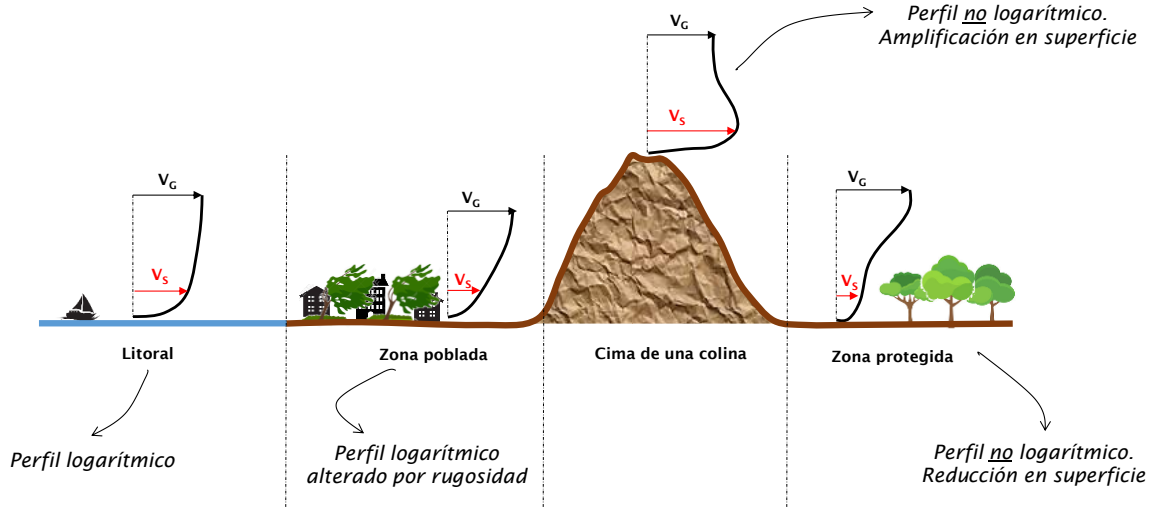


Figura A 13. Representación esquemática del efecto topográfico

El reglamento ASCE 7-16, en su sección 26.8, establece el procedimiento normativo para el cálculo del factor K_{zt} . En esta evaluación, el efecto topográfico se incorporó en los valores de velocidad de diseño como alternativa al procedimiento del reglamento.

En este trabajo, el efecto topográfico es evaluado a través de la identificación de áreas protegidas y expuestas al viento en un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM de las islas del Archipiélago empleado fue obtenido de la base de datos de elevación topográfica ASTER³ de la NASA. Para cada sitio (X, Y) en el DEM, se busca un sitio (K, L) hasta que falle la siguiente condición:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad 11$$

donde Z_{Lim} es la diferencia de altura requerida entre los sitios (X, Y) y (K, L) para obtener una pendiente m , la cual se establece previamente como pendiente de referencia.

Si el sitio (K, L) existe, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de baja exposición al viento. De lo contrario se calcula la pendiente topográfica media (m_T) entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L),

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad 12$$

en donde D es la distancia entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L). Si $|m_T| \leq m$, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de exposición normal. Finalmente, si $|m_T| \geq m$ entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de alta exposición. Las condiciones indicadas anteriormente se ilustran en la Figura A 14.

³ <https://search.earthdata.nasa.gov/>

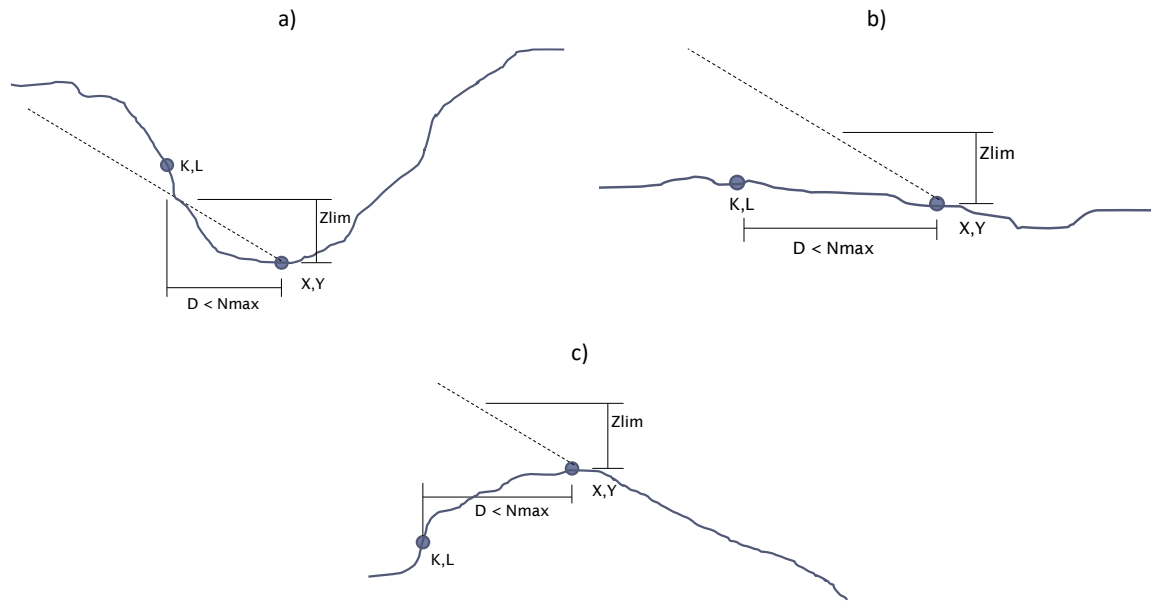


Figura A 14. Exposición por topografía. a) Sitio de baja exposición, b) Sitio de exposición normal, c) Sitio de alta exposición

La Figura A 15 muestra el mapa de factores K_{zt} calculados para San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

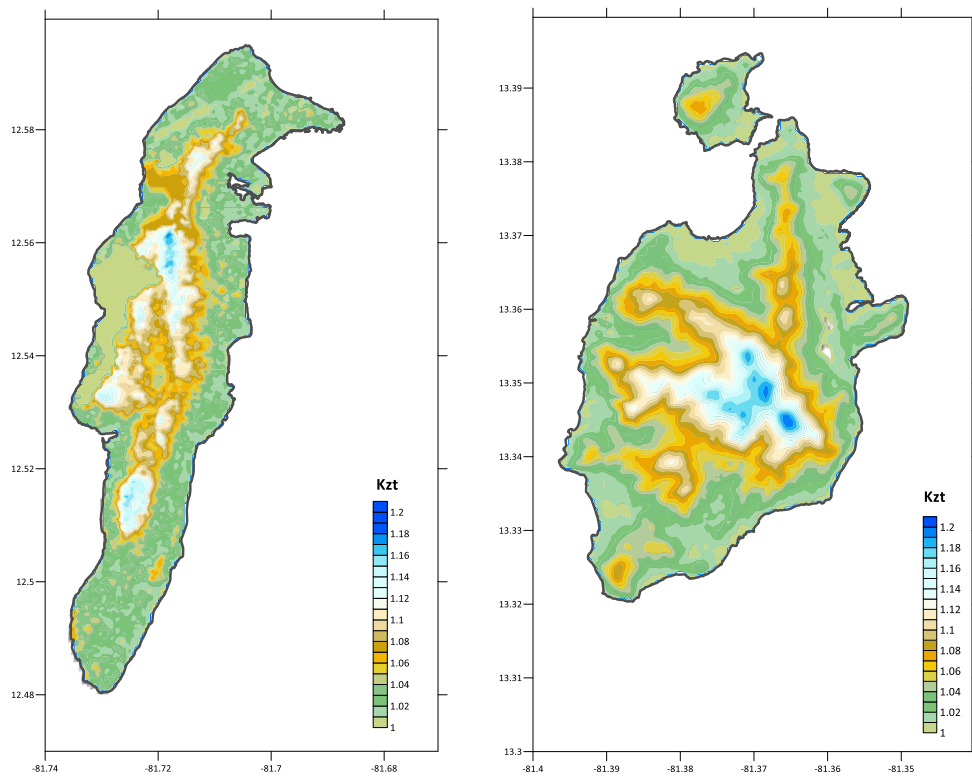


Figura A 15. Mapa de K_{zt} para San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Factor de ráfaga

Es ampliamente reconocido que el daño estructural es principalmente causado por ráfagas de corta duración, por lo cual es un estándar trabajar con ráfagas de 3 segundos para determinar fuerzas y presiones de diseño. Para modificar los valores promediados en una hora a promediados en 3 segundos, se requiere el cálculo de un factor de ráfaga, el cual no es más que una constante que amplifica los valores, buscando aproximar los máximos en menores duraciones. La Figura A 16 muestra una serie de tiempo de velocidad del viento con diferentes tiempos de promediado. La serie roja es promediada en 1 hora, la serie naranja en 1 minuto y la serie gris en 3 segundos.

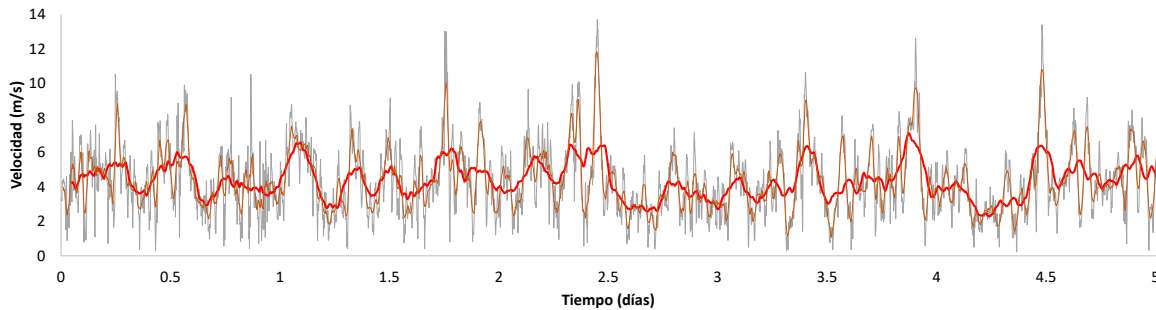


Figura A 16. Series de velocidad del viento con diferentes tiempos de promediado

Las formulaciones existentes en la literatura para el factor de ráfaga se basan en los trabajos de Cartwright & Longuett-Higgins (1956) y Davenport (1964) en teoría de vibraciones aleatorias, enfocados en la distribución de probabilidad de los máximos de una función aleatoria. En este trabajo, se usa la propuesta de ESDU (2002) originalmente desarrollada para tormentas extra tropicales, pero que puede ser trasladada a ciclones tropicales dado que no existe evidencia que sugiera una diferencia fundamental en los factores de ráfaga de estos tipos de tormentas (Sparks y Huang, 1999; Vickery y Skerlj, 2005). El factor de ráfaga K_τ se define en ESDU (2002) como:

$$K_\tau = 1 + gI_u \quad 13$$

en donde g es el factor pico y I_u es la intensidad de turbulencia, la cual no es más que el coeficiente de variación de la serie temporal. El factor pico g se calcula como:

$$g = 1 - 0.193 \left[\frac{T_u}{\tau} + 0.1 \right]^{-0.63} \quad 14$$

en donde τ es la duración de ráfaga (3 segundos) y $T_u = 3.13 \cdot z^{0.2}$. La intensidad de turbulencia I_u se calcula como:

$$I_u = \frac{7.5\eta(0.538 + 0.09 \ln(z/z_0))^{\eta^{16}}}{2.5(1 + 0.156 \ln(u_*/f \cdot z_0)) \cdot (\ln(z/z_0) + 34.5 f \cdot z/u_*)} \quad 15$$

en donde

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot f \cdot z}{u_*} \quad 16$$

Campo de viento superficial

La velocidad del viento en ráfagas de 3 segundos a 10 metros sobre la superficie se calcula como:

$$v_{10} = u(z = 10m) \cdot K_{zt} \cdot K_\tau \quad 17$$

Los campos de viento están dados en términos de la distribución geográfica de v_{10} . Por lo tanto, para cada ciclón histórico se calculan múltiples campos de viento, cada uno correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Para cada conjunto de campos de viento, se ajusta un modelo de probabilidad en cada ubicación de la malla, definiendo así campos de viento probabilistas en los cuales v_{10} es una variable aleatoria.

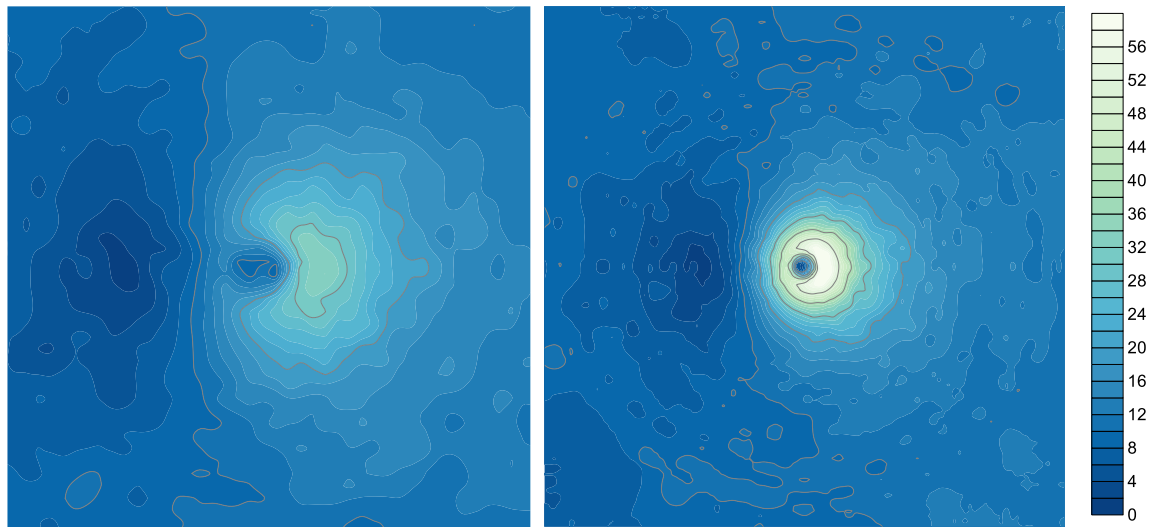


Figura A 17. Ejemplos de campos de viento superficial, para huracanes con velocidad de avance de 10 m/s hacia el norte y presión central de 950 hPa (izq.) y 920 hPa (der.).

Cálculo de las velocidades básicas de diseño

Los campos probabilistas de viento de todos los ciclones simulados se integran por medio del teorema de la probabilidad total, para calcular la tasa anual de excedencia de una velocidad v_{10}^* arbitraria, para una ubicación geográfica específica, como (Bernal et.al. 2021):

$$v(v_{10}^*) = \sum_{i=1}^N P(v_{10} > v_{10}^* | C_i) \cdot F(C_i) \quad 18$$

en donde $v(v_{10}^*)$ es la tasa anual de excedencia de v_{10}^* , N es el número total de ciclones simulados, $P(v_{10} > v_{10}^* | C_i)$ es la probabilidad que v_{10}^* dada la ocurrencia del ciclón C_i y $F(C_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del ciclón C_i .

La tasa de excedencia $v(v_{10}^*)$ constituye el parámetro del proceso de Poisson asociado a la ocurrencia de ciclones cuya velocidad local en el sitio de cálculo supere v_{10}^* . En este sentido, el periodo de retorno Tr de la velocidad v_{10}^* no es más que el valor esperado del tiempo entre eventos que superen v_{10}^* , y se determina como el inverso de la tasa de excedencia:

$$Tr(v_{10}^*) = \frac{1}{v(v_{10}^*)} \quad 19$$

De esta manera es posible calcular velocidades de viento superficial para cualquier periodo de retorno de interés. La Figura A 18 presenta las curvas de amenaza (i.e. velocidad básica del viento vs periodo de retorno) para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, considerando exposición C y terreno plano (sin factor K_{zt}) e incorporando el efecto del Cambio Climático.

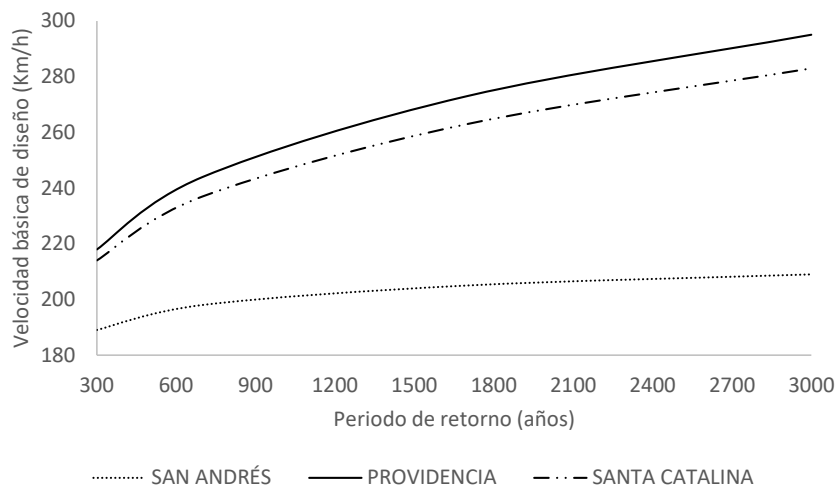


Figura A 18. Curvas de amenaza de la velocidad básica del viento para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, considerando exposición C y terreno plano.

Referencias

- American Society of Civil Engineers (2016). *ASCE/SEI 7-16 Standard: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción sísmo resistente NSR 10*.
- Bernal G. (2013). *TCHM: Programa para el cálculo de amenaza por ciclones tropicales*. CAPRA ROBOT. INGENIAR: Risk Intelligence. Bogotá, Colombia.

- Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). *Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making*. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): *Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience*. Springer Nature. In press.
- Cartwright, D.E. & Longuett-Higgins, M. S. (1956). *The Statistical Distribution of a Maxima of a Random Function*. Proc. Roy. Soc. London. 237:212-232.
- Davenport, A.G. (1964). *Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading*. Proc. Inst. C. E. 28:187-196.
- Emanuel, K. (2006). *Climate and Tropical Cyclone Activity: A New Model Downscaling Approach*. Journal of Climatology, 19, 4797-4802.
- ESDU - Engineering Science Data Unit (2002). *Strong Winds in the Atmospheric Boundary Layer. Part 2: Discrete Gust Speeds*. ESDU 83045. IHS Group.
- Holland, G. (1980). *An Analytic Model of the Wind and Pressure in Hurricanes*. Monthly Weather Review, 108. American Meteorological Society.
- Keport, J. D. (2001). *The Dynamics of Boundary Layer Jets Within the Tropical Cyclone Core. Part I: Linear Theory*. J. Atmos. Sci., 58, 2469–2484.
- Sparks, P.R., Huang, Z. (1999). *Wind Speed Characteristics in Tropical Cyclones*. In: Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, pp.343–350.
- Vickery, P.J., Skerlj, P.F. (2005). *Hurricane Gust Factors Revisited*. J. Struct. Eng. 131, 828–832.
- Vickery, P.J., Wadhera, D. (2008). *Statistical Models of Holland Pressure Profile Parameter and Radius to Maximum Winds of Hurricanes from Flight-Level Pressure and H*Wind Data*. Journal of Applied Meteorology and Climatology. American Meteorological Society,
- Vickery, P.J., Masters, F.J., Powell, M.D, Wadhera, D. (2009a). *Hurricane Hazard Modeling: The Past, Present, and Future*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 97 (2009) 392–405.
- Vickery, P.J., Wadhera, D., Powell, M.D., Chen, Y. (2009b). *A Hurricane Boundary Layer and Wind Field Model for Use in Engineering Applications*. Journal of Applied Meteorology and Climatology. American Meteorological Society,



www.ingeniar-risk.com