

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.39.2.624.175>

Corrección por exposición de las velocidades de viento medidas en dos estaciones de Cuba

Exposure Correction of Wind Speeds Measured in Two Cuban Stations

CAMILA ALDEREGUÍA SÁNCHEZ *
JAVIER BALLOTE ÁLVAREZ **
INGRID FERNÁNDEZ LORENZO ***
VIVIAN BEATRIZ ELENA PARNÁS ****

* Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba.
Orcid: 0000-0002-8102-5300. camilas@civil.cujae.edu.cu. Ingeniera Civil.

**Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería civil. La Habana, Cuba.
Orcid: 0000-0003-3824-6009. jballote@civil.cujae.edu.cu. Ingeniero geofísico.

*** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba.
Orcid: 0000-0002-1223-0968. ingridfl@civil.cujae.edu.cu.
Doctora en Ciencias, ingeniera civil.

**** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba.
Orcid: 0000-0001-7912-7570. vivian@civil.cujae.edu.cu.
Doctora en Ciencias, ingeniera civil.

Correspondencia: Camila Aldereguía Sánchez. Calle 114 entre Rotonda y Ciclovía,
Marianao, La Habana, Cuba. +5372663814.



Resumen

La velocidad básica de viento es determinante en el diseño de obras de ingeniería frente a la acción del viento. Esta velocidad se obtiene a partir de datos de estaciones meteorológicas que cumplen con determinados requerimientos de ubicación y se estima por diferentes métodos estadísticos. En ocasiones las estaciones no cumplen con las condiciones ideales de ubicación, por lo que se hace necesario hacer correcciones a los datos medidos. El objetivo de este trabajo es obtener un factor de corrección para las velocidades del viento medidas en condiciones de ubicación no ideales y comparar las velocidades básicas obtenidas con los valores propuestos para la región de Cuba en estudios internacionales. Se seleccionaron dos estaciones meteorológicas con diferentes rugosidades y se determinaron las velocidades básicas a partir del Método de Tormentas Independientes (MIS). La rugosidad se determinó mediante la aplicación del método de las clasificaciones y el método morfométrico con uso de imágenes del satélite LandSat 8. Los resultados muestran que las velocidades básicas de viento corregidas son similares por ambos métodos. La comparación con los estudios internacionales solo evidenció una adecuada correspondencia en una de las estaciones, por lo que debe ampliarse el estudio a mayor número de estaciones.

Palabras clave: factor de corrección por exposición, LandSat, longitud de rugosidad, NDVI, vientos extremos.

Abstract

Basic wind velocity for civil engineering purpose is determinant for structural design under wind action. Basic wind velocity is obtained from data measurements at meteorological stations supposedly placed in ideal terrain conditions, and it is estimated by different statistical methods. Not all stations accomplish the ideal conditions, therefore, correction of the wind velocity values must be done. The main objective of this paper is to define a roughness correction factor for wind velocity in not ideal conditions, and to compare basic wind velocity obtained with proposed basic wind velocity for the Cuban territory at international studies. Two meteorological stations with different terrain roughness were selected, and the basic wind velocity for each one was obtained by applying the Method of Independent storms (MIS). Roughness was found through the Method of Classifications and the Morphometric Method, with the use of satellite LandSat8 images. Results show that modified basic wind velocities are similar for the two methods. The comparison with international studies proved a good correspondence only with one of the stations, hence it is recommended to extend the study to a greater number of stations.

Keywords: exposure correction factor, extreme winds, LandSat, NDVI, roughness length.

INTRODUCCIÓN

En la determinación de las cargas de viento que actúan sobre una edificación intervienen numerosos factores, el más importante de ellos es la velocidad básica de viento para el diseño. Este valor, que aparece en las normas de cálculo de estructuras en cada país, depende de registros de estaciones meteorológicas a lo largo del tiempo, lo cual permite pronosticar valores de velocidad de viento con determinada probabilidad de ocurrencia en un período dado. Existen dos grupos de métodos para el análisis probabilístico de las velocidades: estos son principalmente los métodos basados en las series de máximos y los métodos basados en las series de excedencia [1]. Dentro de las series de máximos se encuentra la Distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV, siglas en inglés), la cual contiene tres tipos de funciones: Weibull, Gumbel y Frechet; esta última es a la que responden los análisis de las velocidades en la norma de viento vigente en Cuba [2]. Dentro de las series de excedencia se encuentra el “Método de excesos sobre el umbral”, introducido por Pickands [3], y el “Método de Tormentas Independientes” (MIS, siglas en inglés para Method of Independent Storms) desarrollado por Cook [4], que ha sido elegido en este trabajo para llevar a cabo el análisis de los extremos, pues permite hacer una diferenciación de los valores de acuerdo con su origen meteorológico, adecuado en climas mixtos.

Un gran número de países que se por su ubicación geográfica presentan amenaza de ocurrencia de huracanes han adoptado en sus normativas de cálculo ante los efectos del viento, la diferenciación de los eventos según su origen meteorológico para la obtención de las velocidades básicas [5]-[7], sin embargo, en el caso de Cuba no se tiene evidencia en trabajos precedentes [8], [9] a la norma cubana [2], ni en la propia norma. La no diferenciación de las fuentes de los vientos extremos, en virtud de bibliografías especializadas en la temática [10], [11], tiende a producir resultados incorrectos, tales como confundir la distribución más aproximada a los datos reales con la distribución de Frechet, coincidentemente la distribución a la que se atribuye el ajuste de los extremos de las estaciones que dieron lugar a las velocidades básicas de la actual norma cubana.

Por otra parte, los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas deben ser en condiciones específicas establecidas por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), entre las cuales se encuentra la ubicación en terrenos abiertos y llanos [12]. En muchas ocasiones se dificulta el cumplimiento de estos requisitos y los registros de viento dejan de ser representativos, por lo cual es necesario su corrección, que depende fundamentalmente de la determinación de la longitud de rugosidad (z_0) del territorio donde se emplazan las estaciones. Para su obtención se han desarrollado diferentes métodos que se dividen en 3 grupos: Anemométricos [13]-[15], Morfométricos [16]-[18] y de Clasificación [19]-[21]. La selección de uno u otro está basada en

la disponibilidad de datos de las estaciones, simplicidad de uso y precisión de los resultados que se necesite.

Los métodos de clasificaciones consisten en asignar valores de rugosidad a parcelas de un terreno a partir de la similitud de sus características superficiales con las descripciones que aparecen en tablas preelaboradas reconocidas internacionalmente. Una de las clasificaciones más relevantes en este campo fue la realizada por Davenport [22], que posteriormente fue actualizada con la adición de dos nuevas categorías, debido a que, a pesar de considerar valores realistas para terrenos intermedios y rugosos, sobrestimaba los terrenos llanos [23].

Los métodos morfométricos consisten en la parametrización geométrica de los elementos de rugosidad del terreno circundante. El NDVI se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, lo cual permite determinar la vigorosidad de las mismas en función de la energía absorbida o reflejada en diversas partes del espectro electromagnético [24].

El uso de imágenes satelitales constituye la tecnología más actualizada que se emplea para la caracterización de la superficie y la determinación de los parámetros de los cuales dependen los métodos de las clasificaciones y morfométricos. La Teledetección espacial o Remote Sensing es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aéreas hasta satélites [25]. Una de las familias de satélites más conocidas, tanto por su tiempo en servicio como por sus disímiles usos, es el LandSat, que ha estado activo desde 1972 brindando imágenes de la Tierra de manera constante.

Varios estudios sobre el tema [26]-[28] han evidenciado el valor de la aplicación de esta tecnología con el empleo de datos para la obtención de la rugosidad en áreas urbanas, además del uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En áreas rurales varios autores [29], [30] también han empleado esta tecnología para determinar la longitud de rugosidad a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés).

El objetivo de este trabajo es determinar la velocidad básica de viento a partir del Método de Tormentas Independientes (MIS) en dos estaciones meteorológicas cubanas que no cumplen con los requisitos establecidos por la OMM de terreno llano y abierto y evaluar el efecto de los factores de corrección por exposición. Para ello se determinaron las velocidades de viento mediante el método MIS en las dos estaciones seleccionadas y posteriormente se obtuvieron los valores de longitud de rugosidad efectiva de cada estación y se determinaron los coeficientes de corrección de la velocidad. En la segunda sección se compararon las velocidades corregidas por ambos

métodos con las obtenidas de un estudio internacional [31] desarrollado en la región del Caribe que hace uso de la simulación numérica de huracanes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de las velocidades por el MIS

Para el estudio se analizaron dos estaciones meteorológicas que corresponden a la región Occidental y Central de Cuba. Las mediciones de las dos estaciones con las que se trabajó abarcan un período de 20 años, desde el 1 de enero 1996 hasta el 31 de diciembre de 2015. Las velocidades registradas corresponden a los promedios en 10 minutos, almacenados cada tres horas.

El procedimiento asumido para obtener las velocidades a partir del MIS partió de establecer un valor de velocidad umbral y posteriormente realizar un proceso de filtraje de aquellos valores que superaron dicho umbral y que constituyen los máximos de cada tormenta con un período de separación de cuatro días entre los valores por considerar para garantizar la independencia estadística. En este trabajo se estableció un umbral de 35 km/h, ya que, según la escala de Beaufort, para velocidades de viento mayores que 32 km/h comienzan a considerarse los vientos fuertes. A los valores que superan el umbral se les asignó un posicionamiento de menor a mayor para el ajuste hacia una distribución de Gumbel o FT₁. Posteriormente se calculó la probabilidad de ocurrencia de cada valor. En el método MIS original, desarrollado por Cook [4], la probabilidad se halla por la expresión de Gumbel; para el caso de este estudio se aplica este procedimiento con la incorporación de la obtención del valor de la probabilidad a partir de la expresión de Gringorten [11], ver ecuación (1).

$$P(V)^r = \left(\frac{m - 044}{n + 0.12} \right)^r \quad (\text{Ecuación 1})$$

En la ecuación (1), m define el valor que ocupa cada velocidad en el posicionamiento, n es el número último del posicionamiento que define al total de valores y r es el total de excesos por encima del umbral entre el total de años por analizar (20 años).

En Cuba los principales fenómenos meteorológicos que originan los vientos máximos anuales son los sistemas extratropicales, que incluyen las bajas extratropicales, los frentes fríos, los sistemas frontales, las tormentas locales severas y los organismos ciclónicos [1]. El procedimiento descrito se realizó para cada tipo de evento extremo que se identificó en las estaciones para realizar el proceso de separación de acuerdo con el origen.

Posteriormente se calculó la variable reducida (y) para cada evento, representada por la ecuación (2), la cual se graficó contra los valores de velocidades de viento elevados al cuadrado (presión) para acelerar la convergencia hacia una distribución FT1. De esta gráfica se estimaron los valores de los parámetros de la distribución FT1. Finalmente, se determinaron las funciones de distribución de probabilidad acumulada de cada tipo de evento ($Fu(V)$), según la ecuación (3), a partir de la cual se obtuvieron las velocidades de viento correspondientes a la combinación para cada período de retorno requerido, según la ecuación (4).

$$y = -\ln(-\ln(P(V))^r) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$FU(V) = \exp\{-\exp[-(V - u)/a]\} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En la ecuación (3), V es la velocidad de viento, u es el intercepto en la representación gráfica y a la pendiente de la recta.

$$P_T\{\hat{U} < v\} = \prod_{i=1}^n P_T\{\hat{U}_i < v\} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde \hat{U} es la velocidad de ráfaga máxima anual absoluta, \hat{U}_i es la velocidad de ráfaga anual máxima del evento meteorológico i , $P_T[\hat{U} < v]$ y $P_T[\hat{U}_i < v]$ es la distribución de probabilidad acumulada de \hat{U} y \hat{U}_i , respectivamente, y n es el número de eventos meteorológicos significativos.

Descripción de las estaciones y metodología para la corrección de las velocidades

La OMM recomienda que las mediciones de las estaciones deben realizarse a una altura aproximadamente de 10 metros sobre terrenos abiertos [12]. Estas mediciones pueden ser alteradas debido a la influencia de la vegetación y las edificaciones circundantes a las estaciones.

A fin de estudiar las características del terreno circundante a las estaciones se partió de analizar las imágenes obtenidas por LandSat 8. Las imágenes de LandSat 8 fueron recortadas con un radio de 3 km alrededor de cada una de las estaciones, valor recomendado por Barthelmie *et al.* [19] para el cálculo de los distintos parámetros relacionados con la rugosidad. Dado que la resolución espacial del LandSat 8 es de 30 m, para identificar los elementos presentes fue necesario apoyarse en el programa SAS Planet, que tiene vinculado satélites comerciales de alta resolución. En ambas

estaciones (figura 1a-1b) se evidenció una densa vegetación en el área analizada y en la estación de la región Central (figura 1b) se detectó la presencia de una región poblada, aspectos indicadores del no cumplimiento de las recomendaciones de la OMM para la ubicación de las estaciones meteorológicas.

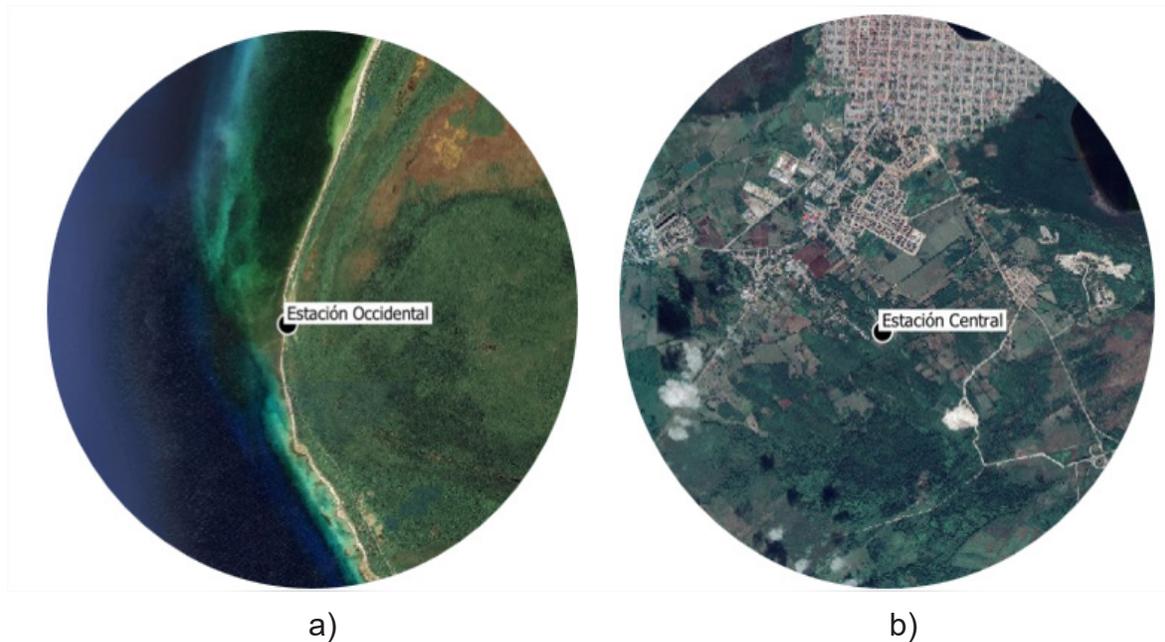


FIGURA 1. ÁREA ALREDEDOR DE LA ESTACIÓN EN UN RADIO DE 3 KM: A) ESTACIÓN DE LA REGIÓN OCCIDENTAL, B) ESTACIÓN DE LA REGIÓN CENTRAL (SAS PLANET)

Para eliminar el efecto de los obstáculos alrededor de las estaciones se determinó el coeficiente de corrección por exposición a partir de la ecuación (5) [12], [19]:

$$ECF = \frac{U_p}{U_s} = \frac{\ln(z_b/z_0) \ln(z_r/z_{0r})}{\ln(z_s/z_0) \ln(z_b/z_{0r})} \quad (\text{Ecuación 5})$$

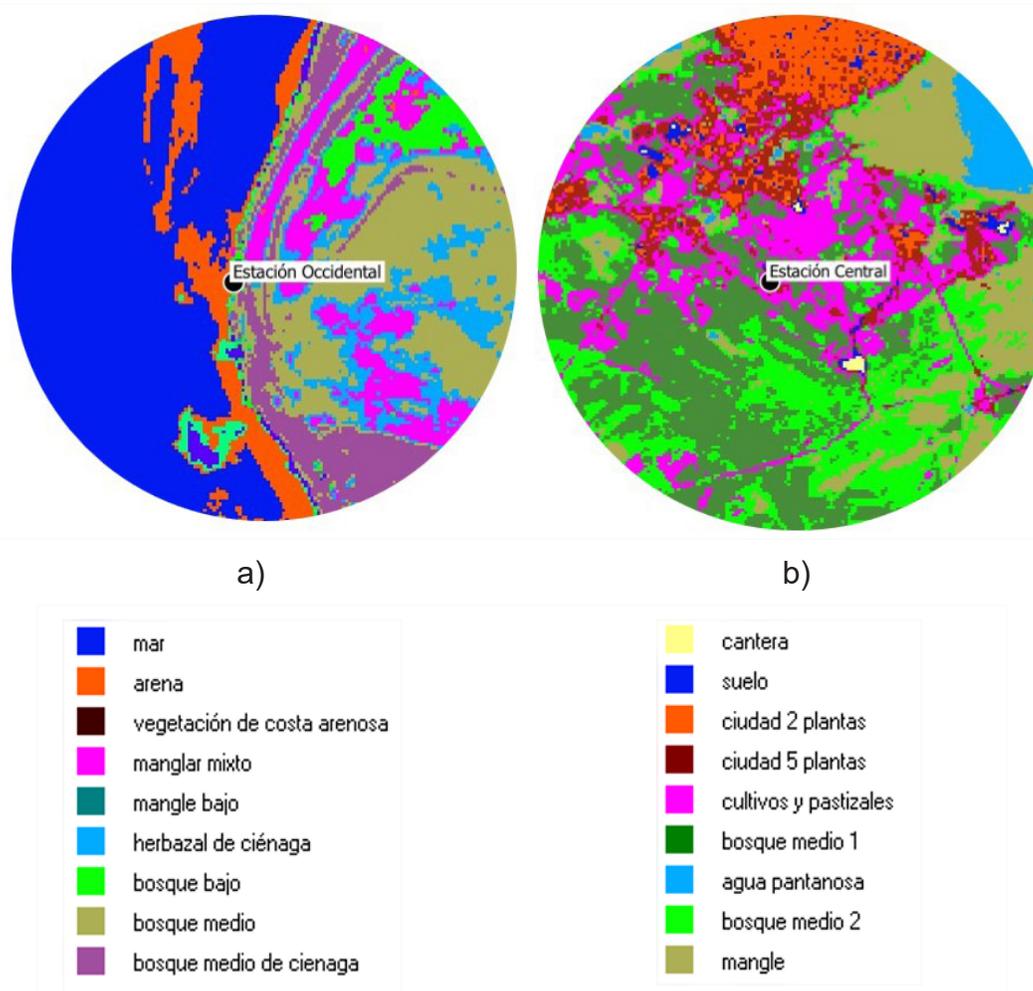
Donde z_b es la altura de mezcla, 60 metros para alturas máximas de elementos de rugosidad entre 20 y 30 metros [12], z_s altura del anemómetro, z_r altura de referencia, 10 metros, z_{0r} longitud de rugosidad de referencia igual a 3 cm para estaciones en tierra [12] y z_0 longitud de rugosidad.

Para la determinación de z_0 se emplearon dos métodos: el método de clasificaciones, específicamente las clasificaciones determinadas por Davenport [22] con la adición

de dos nuevas clases [23], que son las identificadas en las referencias como las más empleadas [16], [32], y el método morfométrico a partir del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés).

Método de las clasificaciones

Para el método de las clasificaciones se obtuvieron los datos del tipo de cobertura del suelo, a través de información satelital de diferentes sensores. En esta investigación se procesaron las imágenes del satélite LandSat 8, correspondientes a julio de 2018. Con el uso de los programas QGIS 3.6 y Multispec se confeccionó un mapa de clasificación no supervisada para ambas zonas de estudio, como se muestra en la figura 2.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA: A) ESTACIÓN DE LA REGIÓN OCCIDENTAL, B) ESTACIÓN DE LA REGIÓN CENTRAL

La clasificación no supervisada consiste en la agrupación de píxeles por sus propiedades espectrales dentro de una clase o clúster representada por un color. Esta clasificación no implica ningún tipo de conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados [33]. Se decidió un análisis de 9 clústers, debido a que un mayor número hacía el mapa ininteligible, y como criterio de agrupación se utilizó ISODATA.

Luego de elaborada la clasificación no supervisada, se tomaron varios puntos de control para cada categoría, y con la ayuda de Google Earth y publicaciones de la vegetación de estas zonas [34] se identificó el tipo de cobertura que existía (figura 2). Una vez reconocidas las distintas clases se asignaron los valores de longitud de rugosidad a cada uno de ellas a partir de la Clasificación de Davenport [22] y las nuevas clases añadidas por Wieringa [23]. En el caso de las zonas urbanas identificadas en la estación Central fueron empleadas las descripciones de Wieringa [23], en las que se recomienda para ciudades un valor entre 0,4 y 0,7 metros, además se tomaron referencias de otros artículos [20], [21] de ciudades semejantes.

Para determinar la longitud de rugosidad representativa del área de la estación se obtuvieron los coeficientes de arrastre para cada clasificación, a partir de la ecuación (6):

$$C_d(z_r) = [0,41/\ln(z_r/z_0)]^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde C_d es el coeficiente de arrastre, z_0 es la longitud de rugosidad y z_r es la altura de referencia (10 m).

Luego se promediaron los valores del coeficiente de arrastre mediante la ecuación (7):

$$C_{d \text{ prom}} = \frac{\sum(C_{di} \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde C_{di} es el coeficiente de arrastre obtenido para cada sector, A_i área de cada sector.

Las clases con área menor que 1% del área total analizada fueron despreciadas. Con el $C_{d \text{ prom}}$ se obtuvo el valor del z_0 área de la estación, despejando de la ecuación (6):

Método morfométrico

El segundo método empleado, NDVI, se desarrolla con el empleo de la teledetección. Moran [29] planteó (ecuación 8) la relación que existe entre la longitud de rugosidad y el NDVI:

$$z_o = \exp(a + b \cdot NDVI) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada medio del área analizada, a y b son coeficientes que dependen del tipo de vegetación del área de estudio y se obtienen de forma matemática mediante el ajuste de la curva que se produce entre las relaciones de los z_o observados en determinados puntos de control tomados de la vegetación local contra sus valores de NDVI obtenidos por la teledetección. La longitud de rugosidad observada para cada valor de NDVI se halló a partir del método morfométrico de la regla simple, ecuación (9):

$$z_o = f_o \cdot Z_H \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde Z_H es la altura promedio de los elementos de rugosidad y f_o es un coeficiente empírico derivado de observaciones. Raupach *et al.* [35] recomiendan $f_o = 0,13$ para cultivos y herbazales y $f_o = 0,06$ para bosques.

A partir del reconocimiento del tipo de terreno circundante (figura 2), explicado anteriormente, se asignaron valores de altura a los distintos puntos de control, con el apoyo de investigaciones publicadas sobre la vegetación de Cuba [34] en estas zonas y de imágenes locales. Los valores de NDVI se obtuvieron con la asistencia del programa QGIS 3.6 a partir del procesamiento de las bandas roja (*BRED*) e infrarrojo cercano (*BNIR*) mediante la ecuación (10):

$$NDVI = (BNIR - BRED)/(BNIR + BRED) \quad (\text{Ecuación 10})$$

El NDVI es un índice adimensional, varía dentro de márgenes conocidos (-1 a +1), lo que facilita notablemente su interpretación. Los valores por debajo de 0,1 corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, mientras que los valores altos son característicos de la actividad fotosintética de las zonas de herbazales, bosques, selva y la actividad agrícola.

Luego de ajustada la curva se estimó el valor de longitud de rugosidad para las zonas rurales empleando el valor medio de NDVI de la imagen multispectral. En la estación de la región Central se evidenció la presencia de una urbanización, la cual se excluyó del análisis de NDVI y se procedió a aplicar el método de las clasificaciones, específicamente las descripciones para ciudad de Wieringa [23]. Ambos resultados se combinaron para obtener el valor de z_o representativo de esta estación a partir de la ecuación (11):

$$z_o = \frac{z_{o,veg} \cdot A_{veg} + z_{o,ciud 2} \cdot A_{ciud 2} + z_{o,ciud 5} \cdot A_{ciud 5}}{A_T} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde $z_{o,veg}$ corresponde al valor de longitud de rugosidad obtenido por el método morfométrico NDVI para las zonas rurales, A_{veg} área de vegetación de la zona circundante a la estación, $z_{o,ciud 2}$ y $z_{o,ciud 5}$ longitud de rugosidad para la clase de ciudad 2 plantas y 5 plantas, respectivamente, obtenidas por el método de las clasificaciones $A_{ciud 2}$ y $A_{ciud 5}$ área que ocupa la clase ciudad 2 plantas y 5 plantas, respectivamente, A_T área total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del procedimiento explicado fueron obtenidos los valores de z_o para establecer las correcciones de las velocidades. La tabla 1 muestra los valores asignados para cada de sector de las estaciones a partir de las descripciones de la tabla de Clasificaciones de Davenport [22] y las nuevas clases asignadas por Wieringa [23].

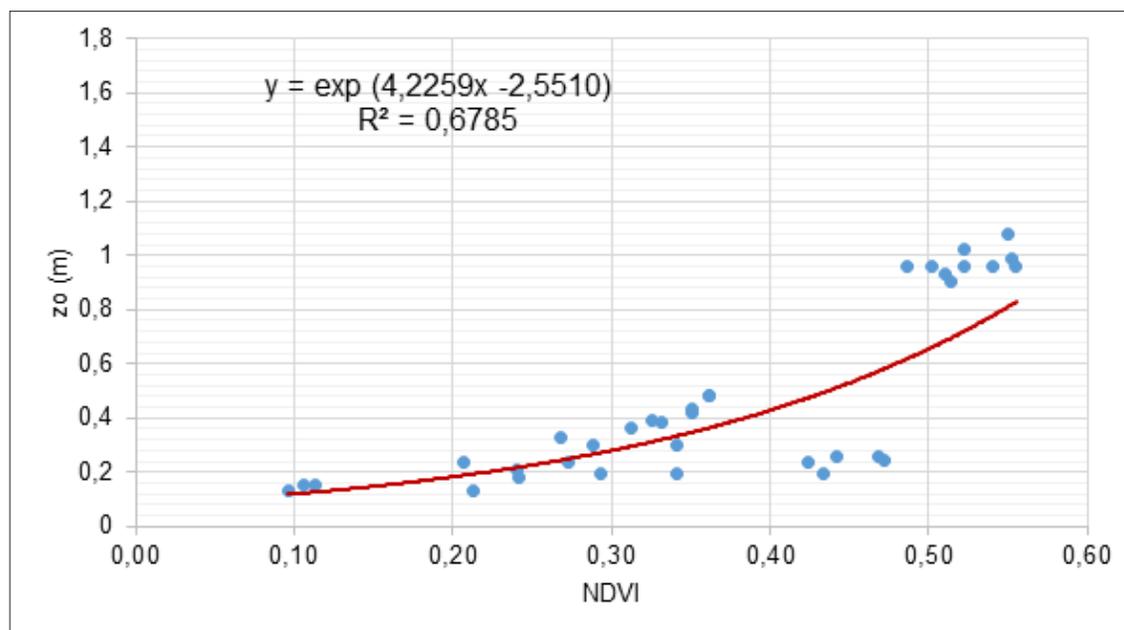
TABLA 1. VALORES DE POR SECTOR (MÉTODO DE LAS CLASIFICACIONES)

Estación 1								
Sectores	Bosque bajo	Bosque medio semideciduo	Manglar mixto	Herbazal de Ciénaga	Vegetación de costa arenosa	Bosque medio de ciénaga	Mar	Arena
	0,03	1	0,25	0,03	0,03	0,5	0,0002	0,005
Estación 2								
Sectores	mangle	Agua pantanosa	bosque medio 1	Ciudad 5 plantas	cultivos y herbazales	bosque medio 2	Ciudad 2 plantas	
	0,25	0,0002	0,5	0,7	0,03	0,5	0,5	

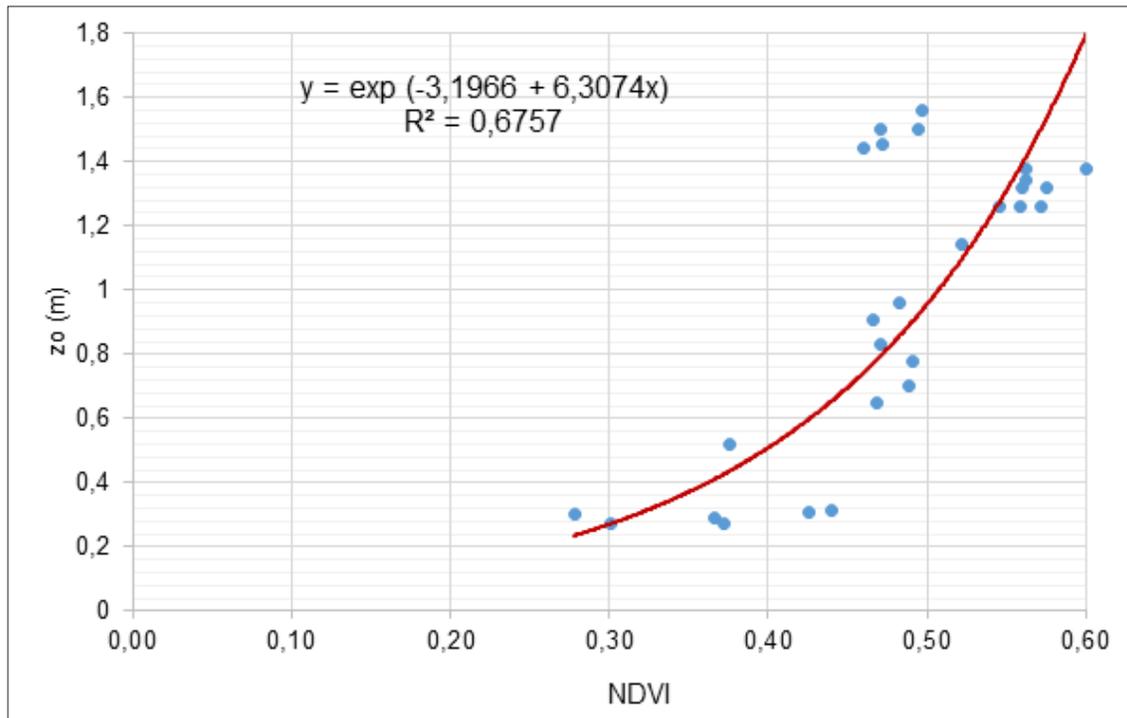
Fuente: elaboración propia.

A partir de los valores de z_0 mostrados en la tabla 1 se obtuvo para cada clase el coeficiente de arrastre mediante la ecuación (6), y luego se consideraron las áreas correspondientes a cada uno de los sectores, y se obtuvo un único valor de coeficiente de arrastre para la estación, como se expresa en la ecuación (7). Una vez obtenido C_{dprom} se determinó por un despeje de la ecuación (6) el valor representativo de para cada estación, estos valores se muestran en la tabla 2.

El análisis de los resultados según el método morfométrico se muestra en la figura 3, donde se exponen las gráficas del NDVI obtenido de las imágenes multispectrales contra los valores de z_0 determinados por la ecuación (9). Los parámetros de a y b se obtuvieron del ajuste de la curva exponencial. Los valores de R^2 superan el 60 %, lo que refleja un buen ajuste según las investigaciones relacionadas con este tema [29], [30].



a)



b)

Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. CURVA DETERMINADO POR EL MÉTODO DE LA REGLA SIMPLE VS. NDVI. A) REGIÓN OCCIDENTAL, B) REGIÓN CENTRAL

La tabla 2 muestra los resultados de z_0 para cada método y los coeficientes de corrección por exposición (ECF) correspondientes, determinados por la ecuación (5).

TABLA 2. RESULTADOS DE z_0 Y ECF PARA CADA ESTACIÓN

Métodos	Estación Occidental		Estación Central	
	(m)	ECF	(m)	ECF
Davenport	0,117	1,072	0,341	1,170
NDVI	0,154	1,093	0,333	1,167

Fuente: elaboración propia.

A partir de los coeficientes de corrección obtenidos por los resultados de z_0 de ambos métodos se determinaron las velocidades corregidas para cada una de las estaciones.

Estos valores se compararon con las velocidades propuestas para Cuba por Vickery [31].

Vickery [31] empleó las mismas técnicas de simulación de huracanes sobre las que se sustenta la obtención de las velocidades básicas de la actual norma estadounidense [6] y obtuvo mapas de velocidades básicas, en mph y para intervalos de promediación de 3 s, para diferentes períodos de retorno sobre Cuba. En la figura 4 se muestra el mapa de velocidades de viento obtenido para 50 años de período de retorno.

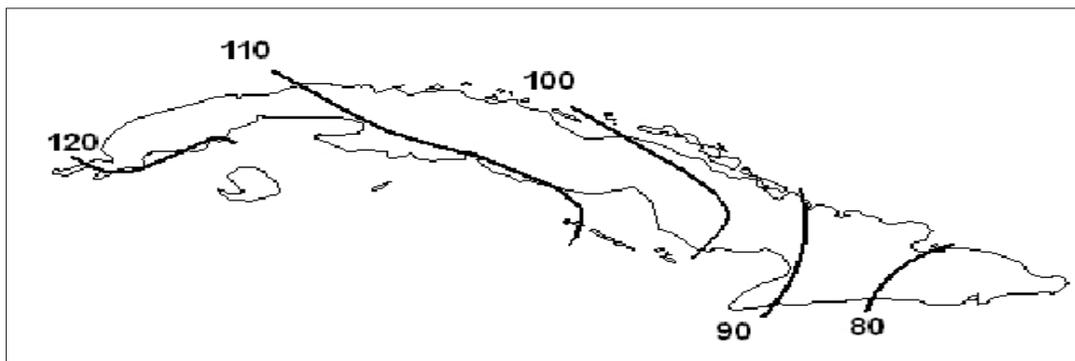


FIGURA 4. MAPA DE VELOCIDADES BÁSICAS PARA CUBA, PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS [31]

Para comparar las velocidades de Vickery con las de este estudio, se convirtieron las velocidades de mph a m/s y las velocidades obtenidas en la investigación se transformaron de un intervalo de promediación de 10 min a 3s teniendo en cuenta las características de ubicación de las estaciones. Se empleó para ello la ecuación (12) [36] y se determinó el factor de ráfaga que convierte de un intervalo de 10 min a 3 segundos.

$$G = 1 + \frac{I}{2} \ln(T/t) \quad (\text{Ecuación 12})$$

En la ecuación (12), I es la intensidad de turbulencia (ecuación 13), T es el período de promediación de la velocidad media del viento (10 min) y t es el período de duración de la ráfaga (3 s).

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)} \quad (\text{Ecuación 13})$$

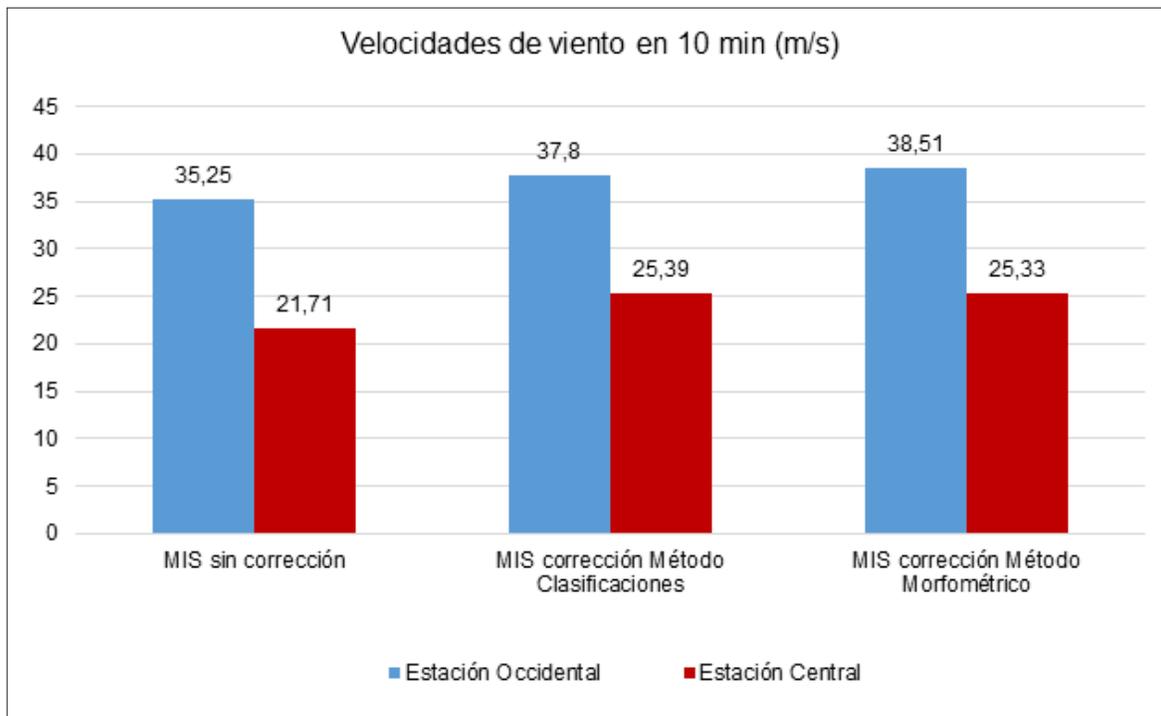
Donde z_s es la altura de los anemómetros, 10 metros para ambas estaciones, y z_o es la longitud de rugosidad.

La tabla 3 muestra los valores de la intensidad de turbulencia y el factor de ráfaga calculado con los z_o obtenidos por los dos métodos para las dos estaciones. Se puede observar que los valores de rugosidad de las dos estaciones difieren en correspondencia con el aumento de la intensidad y el factor de ráfaga. Los valores de coeficiente de ráfaga son mayores en el caso de la estación de la región Central motivado por una mayor rugosidad con respecto a la estación de la región Occidental. Al existir una mayor rugosidad, determinada por los obstáculos circundantes, en este caso extensas zonas de vegetación y urbanización, las turbulencias aumentan y, por consiguiente, el coeficiente de ráfaga.

TABLA 3. VALORES DE LONGITUD DE RUGOSIDAD, INTENSIDAD DE TURBULENCIA Y COEFICIENTE DE RÁFAGA CORRESPONDIENTE A CADA ESTACIÓN

Métodos	Estación Occidental			Estación Central		
	(m)	I	G	(m)	I	G
Davenport	0,119	0,226	1,599	0,341	0,296	1,784
NDVI	0,154	0,239	1,633	0,333	0,294	1,779

Fuente: elaboración propia.

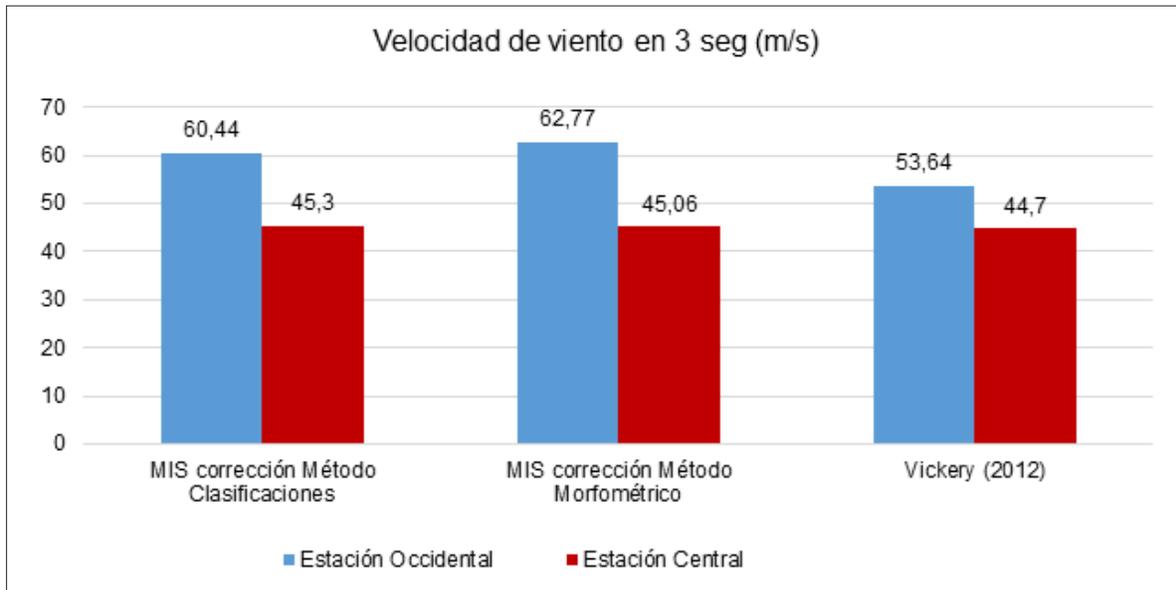


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5. GRÁFICO DE VELOCIDADES DE VIENTO OBTENIDAS POR MIS SIN CORREGIR Y MIS CORREGIDAS EN INTERVALOS DE 10 MIN

Por otra parte, las correcciones por exposición al MIS aumentaron los valores de la velocidad (figura 5) debido a que la rugosidad alrededor de las estaciones es superior a la indicada por la OMM, lo cual confirma la influencia de las rugosidades en las velocidades de viento y la importancia de su consideración para determinar las velocidades básicas de viento a partir de los datos de estaciones meteorológicas con terrenos circundantes no ideales.

En la figura 6 se muestra la gráfica de los valores de las velocidades en un intervalo promedio de 3 segundos obtenidas por la aplicación del MIS con correcciones y la formulación de G de Ishizaki [36] y los valores obtenidos por Vickery. La estación de la región Occidental se encuentra en la región de las velocidades de 53,64 m/s y la estación de la región Central en la región de las velocidades de 44,7 m/s con relación a las de Vickery.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. GRÁFICA DE VELOCIDADES DE VIENTO DEL MIS CORREGIDAS Y VICKERY EN INTERVALOS DE 3 SEGUNDOS

Según se observó, existe para la estación de la región Central una buena correspondencia entre los valores, mientras que para la estación de la región Occidental los valores obtenidos con el MIS en este trabajo son mayores que los obtenidos por Vickery.

CONCLUSIONES

En esta investigación se determinaron los factores de corrección por exposición en dos estaciones cubanas, a partir de estimar las longitudes de rugosidad correspondientes al terreno circundante por el método de las Clasificaciones de Davenport [22] y el método del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Para el desarrollo de ambos métodos se empleó la teledetección con las imágenes del satélite LandSat 8 y los programas QGIS y Multispec.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que existe una adecuada correspondencia entre los resultados de z_0 estimados por el método de las clasificaciones y el NDVI en ambas estaciones. Por lo tanto, se pone de manifiesto la potencialidad del empleo del NDVI para la obtención del factor de corrección por rugosidad.

Se confirma la influencia de la rugosidad de terreno en los parámetros de intensidad de turbulencia, ráfaga y en las velocidades de viento, en las cuales se apreció un

aumento de 8 % para la estación Occidental y 14,5 % para la estación Central de las velocidades debido a la aplicación del factor de corrección.

Con relación a los resultados comparativos entre los valores obtenidos en las estaciones y los valores del estudio de Vickery [31], si bien existe una buena correspondencia para la región Central, la región Occidental aún difiere en un 15 %, por lo que debe ampliarse el estudio a mayor número de estaciones.

REFERENCIAS

- [1] I. Fernández *et al.*, “Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas”, *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 7, pp. 15-25, 2016.
- [2] NC-285, Carga de viento. Método de cálculo, 2003 Cuba.
- [3] J. I. Pickands, “Statistical inference using extreme order statistics”, *The annals of statistics*, vol. 3, pp. 119-131, 1975.
- [4] N. J. Cook, “Towards better estimation of extreme winds”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 9, pp. 295-323, 1982.
- [5] Australian/New Zeland Standart: Structural Design actions. Part 2: Wind Actions, 2011.
- [6] American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2016.
- [7] IS: 875 (Part 3). Wind Loads on Buildings and Structures - Proposed draft & Commentary. Document No: IITK GSDMA-Wind 02-V 50, 2012.
- [8] R. Pascual, “Fuerzas del viento sobre las estructuras. Fuerzas producidas por los vientos extremos”, *Ingeniería Civil*, vol. 28, n.º 1, pp. 1-77, 1977.
- [9] O. Pérez, “Velocidades máximas del viento de diferentes frecuencia y dirección para el cálculo de la altura de las olas en los embalses”, *Ingeniería Civil*, vol. 25, no. 4, pp. 367-393, 1974.
- [10] A. Kruger *et al.*, “Strong winds in South Africa. Part 2: Mapping of updated statistics,” *Journal of the south african institution of civil engineering*, vol. 55, n.º 2, pp. 46-58, enero 2013.
- [11] I. Fernández *et al.*, “Utilización del Método de Tormentas Independientes para el cálculo de velocidades básicas de viento en Cuba”, presentado en 11º Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de la Construcción, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2017.
- [12] J. Wieringa, “An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 102, n.º 431, pp. 241-253, 1/1/1976 1976. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243119>

- [13] Y. C. He *et al.*, “Estimation of roughness length at Hong Kong International Airport via different micrometeorological methods”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 171, pp. 121-136, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.019>
- [14] F. T. Lombardo *et al.*, “Characterization and comparison of aerodynamic roughness lengths using ground-based photography and sonic anemometry”, *Journal of Structural Engineering*, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001768)
- [15] C. W. Kent *et al.*, “Evaluation of urban local-scale aerodynamic parameters: implications for the vertical profile of wind speed and for source areas”, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 164, pp. 183-213, 28/4/2017 2017. <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0248-z>
- [16] G. V. Gaona *et al.*, “Estimación de la longitud de rugosidad aerodinámica a partir de imágenes MODIS y LandSat,” 2015.
- [17] J. Godlowska y W. Kaszowski, “Testing various morphometric methods for determining the vertical profile of wind speed above Krakow, Poland”, *Boundary-Layer Meteorology*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00440-9>
- [18] A. Li *et al.*, “Aerodynamic roughness length estimation with LiDAR and imaging spectroscopy in a shrub-dominated dryland”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.83.6.415>
- [19] R. J. Barthelmie *et al.*, “Estimation of sector roughness lengths and the effect on prediction of the vertical wind speed profile”, *Boundary Layer Meteorology*, vol. 66, pp. 19-47, 10/1/1993 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00705458>
- [20] C. Palese *et al.*, “Mapa de Rugosidad Aerodinámica Superficial de la Ciudad de Neuquén”, presentado en Actas Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Viento, 2008, vol. 8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2454.4800>
- [21] J. Silva *et al.*, “Roughness length classification of Corine Land Cover classes”, presentado en Proceedings of the European Wind Energy Conference, Milan, Italy, 2007, vol. 710, p. 110: Citeseer.
- [22] A. G. Davenport, “Rationale for determining design wind velocities”, *Journal of the Structural Division*, vol. 86, pp. 39-68, 1960.
- [23] J. Wieringa, “Updating the Davenport roughness classification”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 41-44, pp. 357-368, 1992. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90434-C](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90434-C)
- [24] N. Robinson *et al.*, “A dynamic LandSat derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) product for conterminous United States,” *Remote sensing*, vol. 9, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>

- [25] I. J. Condori *et al.*, “Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico- provincia Caranavi en los años 1989-2014”, *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 9, pp. 25-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>
- [26] M. Abbas, H. Mahmood, B. Bin y T. Abbas, “Surface roughness distribution map for Iraq using satellite data and GIS techniques”, *Arabian Journal of Geosciences*, p. 13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05802-z>
- [27] M. Rashid, A. Bin, T. Rashid, B. Bin y H. Dutsenwai, “Assessment of aerodynamic roughness length using remotely sensed land cover features and MODIS”, presented at the 1st International virtual conference of environmental sciences, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012015>
- [28] T. Ullmann y G. Stauch, “Surface roughness estimation in the Orog Nuur Basin (Southern Mongolia) using Sentinel-1 SAR times series and ground-based photogrammetry”, *Remote sensing*, vol. 12, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12193200>
- [29] M. S. Moran, “A satellite-based approach for evaluation of the spatial distribution of evapotranspiration from agricultural lands”, 1990.
- [30] M. Yu *et al.*, “A method for estimating the aerodynamic roughness length with NDVI and BRDF signatures using multi-temporal Proba-V data”, *Remote sensing*, 2017. <http://doi.org/10.3390/rs9010006>
- [31] P. J. Vickery, “Design wind speeds in the Caribbean”, presentado en Advances in Hurricane Engineering 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412626.099>
- [32] A. Vladimirovich, “Understanding the impact of vegetation on surface roughness length for enhancing wind resource characterization in Iowa”, Master of Science, University of Northern Iowa, 2014.
- [33] E. Chuvieco, “Fundamentos de teledetección espacial (n.º 526.982 C564.1996)”. Ediciones Rialp, 1996.
- [34] F. Delgado *et al.*, “Vegetación de la reserva de la biosfera Península de Guanahacabibes, Cuba”, *ECOVIDA*, vol. 4, 2013.
- [35] M. R. Raupach *et al.*, “Rough wall turbulent boundary layers,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 44, pp. 1-25, 1991. <https://doi.org/10.1115/1.3119492>
- [36] H. Ishizaki, “Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13, n.º 1-3, pp. 55-66, 1983. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90128-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(83)90128-9)