

Classification of Santa Ana winds for the evaluation of their wind potential in La Rumorosa, Baja California, Mexico

Clasificación de los vientos de Santa Ana para la evaluación de su potencial eólico en La Rumorosa, Baja California, México

[Marlene Zamora-Machado](#)^{1*}, [Alejandro Adolfo Lambert-Arista](#)¹, [Onofre Rafael García-Cueto](#)², [Oscar Alfredo Jaramillo-Salgado](#)³, [Elia Leyva-Sánchez](#)⁴, [Rafael Carlos Reynaga-López](#)¹, [Jesús Rigoberto Herrera-García](#)¹, [Noemí Lizárraga-Osuna](#)¹, [Rosa Citlalli Anguiano-Cota](#)¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, 21280 Mexicali, Baja California, Mexico.

² Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, 21280 Mexicali, Baja California, Mexico.

³ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, 62580 Temixco, Morelos, Mexico.

⁴ Tecnológico Nacional de México, Campus Mexicali, 21376 Mexicali, Baja California, Mexico.

* Corresponding author. E-mail: zamora.marlene@uabc.edu.mx

ABSTRACT. La Rumorosa region, located in northwestern Mexico, is characterized by intense local wind speeds, which led to the installation of wind farms. In this area, the contribution of wind power from the Santa Ana winds (SAWs), which are part of the regional wind regime, is unknown. In addition, the valley–mountain winds, cold fronts, extratropical storms, and other meteorological phenomena contribute to the totality of wind power production. For this reason, this study focused on classifying SAW events over a period of 10 years (2005–2014) considering the following categories: “weak,” “moderate,” and “strong.” The criteria for the analysis were associated with the average wind velocity magnitude, the dimensionless pressure gradient, and the normalization of pressure values, gust magnitude, and average wind velocity magnitude. The proposed classification provides information on the behavior of SAW in the area and, by extension, their contribution to wind power generation in La Rumorosa.

Key words: Santa Ana winds, categories, wind power.

RESUMEN. La región de La Rumorosa, localizada en el noroeste de México, se caracteriza por sus fuertes velocidades en la magnitud del viento a nivel local, lo que ha originado la instalación de parques eólicos. En esta zona, no se conoce de forma precisa la contribución de energía eléctrica eólica de los vientos de Santa Ana (VSA), que son parte del régimen de viento regional. Además los vientos de valle-montaña, los frentes fríos, las tormentas extratropicales y otros fenómenos meteorológicos, en conjunto, contribuyen a la totalidad de energía eléctrica generada. Por ello, este estudio se centra en clasificar, por un periodo temporal de 10 años (2005-2014), los eventos de VSA considerando las categorías: “débil”, “moderado” y “fuerte”. En el análisis se aplicaron criterios asociados a los parámetros de la magnitud de la velocidad promedio del viento, el gradiente de presión adimensional y la normalización de valores de presión, magnitud de la velocidad de ráfaga y magnitud de la velocidad promedio del viento. La clasificación propuesta proporciona información sobre el comportamiento de los VSA en la zona y, por ende, su contribución en la generación de energía eólica en La Rumorosa.

Palabras clave: vientos de Santa Ana, categorías, energía eólica.



INTRODUCTION

Santa Ana winds (SAWs) are foehn-type desert winds that occur seasonally in southern California, United States, and northern Baja California, Mexico, generally with a northeasterly or easterly direction (Glickman and Zenk 2000). The winds blow with great magnitude and strong gusts, which flow down the mountains and plateaus (Conil and Hall 2006). The region presents a complex topography, including broad mountain ranges, low coastal plains, and high desert plateaus (Castro et al. 2006). On the other hand, SAWs have important implications for the pattern of coastal currents (Navarro-Olache et al. 2020) and for the influx of mineral dust and its associated contributions of iron and manganese to the coastal waters of the California Current System and the Gulf of California, which promote primary productivity (Félix-Bermúdez et al. 2017, Álvarez and Carbajal 2019, Álvarez et al. 2020).

The season of SAW events begins in September and ends in April. This is caused by a surface high-pressure system over the Great Basin and an offshore low-pressure system off southern California that induce a synoptic pressure gradient and force the shift of surface winds from the northeastern quadrant (Jones et al. 2010). The approximate average is 20 events per period (standard deviation: 5) (Raphael 2003). Previous works report surface speeds with average wind magnitudes between 28 and 56 km·h⁻¹ (15–30 knots) (Small 1995), which correspond to favorable ranges in wind magnitude for wind power generation, and magnitudes of gust speed values that exceed 25 m·s⁻¹ (56 miles per hour) (Sommers 1978, Trasviña et al. 2003, Bytnerowicz et al. 2010). The occurrence of events is frequently higher during autumn and winter than during spring and summer, with maximum activity in December and January (Jones et al. 2010). Sommers (1978) mentioned that events occurred from October to May. As described by Raphael and Finley (2007), no Santa Ana event has been recorded between June and August, due to the patterns of the Pacific high-pressure system located west of California.

SAW events have been the object of study for several years due to their different impacts on the border of Baja California, Mexico, and California, United States (Castro et al. 2003, Hu and Liu 2003, Raphael 2003, Trasviña et al. 2003, Westerling et al. 2004, Sosa-Ávalos et al. 2005, Conil and Hall 2006, Miller and Schlegel 2006, Hsu et al. 2007, Hughes et al. 2009, Bytnerowicz et al. 2010, Hughes and Hall 2010, Jones et al. 2010, Jin et al. 2014, Langford et al. 2015, Hatchett et al. 2018, Álvarez et al. 2020, Gershunov et al. 2021, Serpa-Usta et al. 2021). Within the region impacted by this phenomenon, there are, on the side of the Pacific Ocean, highly urbanized areas, important agricultural areas, forests, and deserts (Castro et al. 2006).

SAWs occur in the region of La Rumorosa, which is characterized as a site with extraordinary potential for harnessing wind power. A study by the Ensenada Center for Scientific

INTRODUCCIÓN

Los vientos de Santa Ana (VSA) son vientos desérticos tipo *foehn* que se presentan de manera estacional en el sur de California, Estados Unidos, y en el norte de Baja California, México, generalmente dirigidos desde el noreste o el este (Glickman y Zenk 2000). Los vientos soplan con gran magnitud y fuertes ráfagas, que fluyen hacia abajo de las montañas y mesetas (Conil y Hall 2006). La región presenta una topografía compleja, incluso amplias cadenas montañosas, llanuras costeras bajas y mesetas desérticas altas (Castro et al. 2006). Por otro lado, los VSA tienen importantes implicaciones en el patrón de corrientes costeras (Navarro-Olache et al. 2020) y en la entrada de polvo mineral y sus aportes asociados de hierro y manganeso a las aguas costeras del Sistema de la Corriente de California y el golfo de California, que promueven la productividad primaria (Félix-Bermúdez et al. 2017, Álvarez y Carbajal 2019, Álvarez et al. 2020).

La temporada de eventos de VSA comienza en septiembre y finaliza en abril; un sistema superficial de alta presión sobre la Gran Cuenca y un sistema de baja presión en alta mar en el sur de California inducen un gradiente de presión sinóptico que impulsa vientos en la superficie desde el cuadrante noreste (Jones et al. 2010). El promedio aproximado es de 20 eventos por periodo (desviación estándar: 5) (Raphael 2003). Se han observado velocidades en la superficie con magnitud promedio del viento entre 28 y 56 km·h⁻¹ (15-30 nudos) (Small 1995), que corresponden a rangos en la magnitud del viento propicias para la generación de energía eólica, además de valores que exceden los 25 m·s⁻¹ en la magnitud de velocidades ráfagas (56 millas por hora) (Sommers 1978, Trasviña et al. 2003, Bytnerowicz et al. 2010). La ocurrencia de eventos es frecuentemente mayor durante otoño e invierno que durante primavera y verano, con un máximo de actividad en diciembre y enero (Jones et al. 2010). Sommers (1978) mencionaron que la ocurrencia era desde octubre hasta mayo. De acuerdo con lo descrito por Raphael y Finley (2007), no se ha registrado ningún evento Santa Ana entre junio y agosto, debido a los patrones del sistema de alta presión del Pacífico situado al oeste de California.

Los eventos de VSA han sido objeto de estudio desde hace varios años debido a sus diferentes impactos en la frontera de Baja California, México, y California, Estados Unidos (Castro et al. 2003, Hu y Liu 2003, Raphael 2003, Trasviña et al. 2003, Westerling et al. 2004, Sosa-Ávalos et al. 2005, Conil y Hall 2006, Miller y Schlegel 2006, Hsu et al. 2007, Hughes et al. 2009, Bytnerowicz et al. 2010, Hughes y Hall 2010, Jones et al. 2010, Jin et al. 2014, Langford et al. 2015, Hatchett et al. 2018, Álvarez et al. 2020, Gershunov et al. 2021, Serpa-Usta et al. 2021). Dentro de la región de impacto de este fenómeno, se encuentran, a un costado del océano Pacífico, áreas altamente urbanizadas, importantes zonas agrícolas, bosques y desiertos (Castro et al. 2006).

Los VSA se presentan en la región de La Rumorosa, caracterizada como un sitio con un extraordinario potencial para la generación de energía eólica. Un estudio del Centro de

Research and Higher Education indicates that, in the area, the presence of SAW events increases the magnitude of average wind speeds (CICESE 2003). During the first 5 years of operations of the wind farm La Rumorosa I, the presence of SAW events in a wind turbine was analyzed, and the average annual electricity generation of that turbine was 16% in 2011 (Zamora 2016). Currently, La Rumorosa region has 52 wind turbines in operation in 2 wind farms, and there are plans to install more in the future (NADB 2013, CEE 2017).

According to Rolinski et al. (2019), the criteria for defining SAWs depend on both the topic of interest regarding the phenomenon (for example, catastrophic forest fires) and its spatiotemporal variability. The velocity magnitude, direction, local pressure gradient, temperature, and relative humidity are used to define SAWs (Raphael 2003).

In this work, we classify SAWs in La Rumorosa because of the favorable conditions found at this site for harnessing wind energy.

MATERIALS AND METHODS

For this study, we analyzed data on the magnitude of wind speed, magnitude of gust speed, and direction of the wind, as well as data on relative humidity and local atmospheric pressure measured at the surface, over a period of 10 years (2005 to 2014), in periods measured at 10-min intervals at a height of 10 m above ground level. Data from 2005 to 2014 from the weather station in La Rumorosa were obtained by formal request to the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, Mexico), with 2% missing data; in addition, the data corresponding to the last 90 days (CONAGUA 2022) can be consulted online. Table 1 shows the geographical characteristics of La Rumorosa weather station (CONAGUA 2022), and Figure 1 shows the geographical location of the station. In addition, local atmospheric pressure values and atmospheric pressure values corresponding to the high-pressure center formed in the Great Basin for each recorded event were obtained from the synoptic maps of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of the United States (NWS 2007).

Study area

La Rumorosa was selected to study SAW events because of the availability of on-site surface measurements and because of the various studies that contain information that demonstrates SAW occurrence in southern California (Sommers 1978, Small 1995, Raphael 2003, Keeley et al. 2004, Castro et al. 2006, Conil and Hall 2006, Hughes and Hall 2010, Jones et al. 2010, Ackerman and Knox 2011, Abatzoglou et al. 2013, Cao and Fovell 2013, Fovell and Cao 2017). Data were compared with that of nearby stations, such as Tijuana, Ensenada, and Mexicali; this confirmed that the readings captured at La Rumorosa station recorded the presence of SAW events more frequently than those at the other stations.

Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada indica que, en la zona, la presencia de los eventos de VSA incrementan la magnitud de la velocidad promedio del viento (CICESE 2003). Durante los primeros 5 años de operación del parque eólico La Rumorosa I, se analizó la presencia de los eventos de VSA en una turbina eólica, y la generación eléctrica promedio anual de esa turbina fue del 16% en 2011 (Zamora 2016). Actualmente, en la región de La Rumorosa, existen 52 aerogeneradores en operación en 2 parques eólicos, y se planea que se instalen aún más en el futuro (NADB 2013, CEE 2017).

De acuerdo con Rolinski et al. (2019), el criterio para definir los VSA depende tanto del tema de interés con respecto al fenómeno (por ejemplo, incendios forestales catastróficos) como de su variabilidad espaciotemporal. Las variables para definir los VSA son su magnitud de velocidad, dirección, gradiente local de presión, temperatura y humedad relativa (Raphael 2003).

En este trabajo, se realiza una clasificación de los VSA para el sitio de La Rumorosa debido a sus condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía eólica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio, se analizaron datos de la magnitud de velocidad del viento, magnitud de la velocidad de ráfaga y dirección del viento, así como datos de la humedad relativa y la presión atmosférica local medidas en superficie, en un lapso de 10 años (de 2005 a 2014), en periodos medidos en intervalos de 10 min a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Los datos de 2005 a 2014 de la estación meteorológica en La Rumorosa fueron obtenidos por solicitud formal a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, México), con un 2% de datos faltantes; adicionalmente, se pueden consultar en línea los datos correspondientes a los últimos 90 días (CONAGUA 2022). En la Tabla 1, se muestran las características geográficas de la estación meteorológica de La Rumorosa (CONAGUA 2022), y en la Figura 1 se muestra la ubicación geográfica de la estación. Además, se obtuvieron los valores de presión atmosférica local y el valor de presión atmosférica correspondiente al centro de alta presión formado en la Gran Cuenca para cada evento registrado a partir de los mapas sinópticos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (NWS 2007).

Área de estudio

Se seleccionó La Rumorosa para el estudio de eventos de VSA por la disponibilidad de las mediciones de superficie en sitio y, además, por la información contenida en estudios que demuestran la ocurrencia en el sur de California (Sommers 1978, Small 1995, Raphael 2003, Keeley et al. 2004, Castro et al. 2006, Conil y Hall 2006, Hughes y Hall 2010, Jones et al. 2010, Ackerman y Knox 2011, Abatzoglou et al. 2013, Cao y Fovell 2013, Fovell y Cao 2017). Se realizó una comparación de los datos correspondientes a las estaciones cercanas,

Table 1. Geographical characteristics of the weather station.
Tabla 1. Características geográficas de la estación meteorológica.

Automatic weather station	Latitude (north)	Longitude (west)	Elevation (meters above sea level)
La Rumorosa	32°16'20.00"	116°12'20.00"	1,262

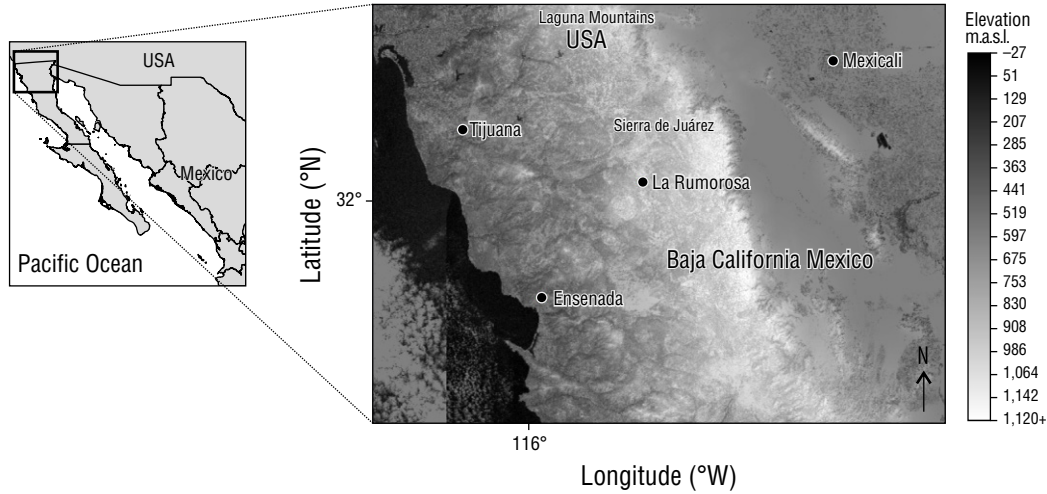


Figure 1. Geographical location of La Rumorosa weather station in the northern area of Baja California, Mexico (INEGI 2022). Meters above sea level: m.a.s.l.

Figura 1. Localización geográfica de la estación meteorológica de La Rumorosa en la zona norte de Baja California, México (INEGI 2022). Metros sobre el nivel del mar: m.a.s.l., por sus iniciales en inglés.

Categories for evaluating Santa Ana winds

Set (1) belongs to all the data considered as SAWs from La Rumorosa weather station. The result was verified through the formation of the Great Basin high-pressure center on surface analysis maps (NWS 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013):

$$V_i = \{v(\Delta t_i), \theta(\Delta t_i), hr(\Delta t_i) \mid v(\Delta t_i) > 4, \theta(\Delta t_i) \in [0,90], hr(\Delta t_i) < 40, \Delta t_i = (t_{i+a} - t_i) > 3\}, \quad (1)$$

where V_i is the magnitude of the wind speed, $v(\Delta t_i)$ is the magnitude of the wind speed in meters per second, $\theta(\Delta t_i)$ is the wind direction in sexagesimal degrees, $hr(\Delta t_i)$ is the relative humidity shown as a percentage, t_{i+a} is the upper limit of the time interval, t_i is the lower limit, and Δt_i is a time interval greater than 3 h.

Once the data were filtered, different classifications were made taking as reference the data obtained through the meteorological station and the high-pressure center formed in the Great Basin. Events according to this classification were identified on the same day, up to 2 times, and, due to the treatment of the information, they were shown as the total amount of time of SAW events; that is, if the year 2005 had a total of 22 events, with the time analysis, this would correspond to 12 days of SAWs in that year.

como Tijuana, Ensenada y Mexicali, y se encontró que las lecturas capturadas en la estación de La Rumorosa registran la presencia de los eventos de VSA con mayor frecuencia que aquellas en las otras estaciones.

Categorías para la evaluación de los vientos de Santa Ana

El conjunto (1) pertenece a todos los datos considerados como VSA provenientes de la estación meteorológica de La Rumorosa. El resultado se verificó a través de la formación del centro de alta presión de la Gran Cuenca en los mapas de análisis de superficie (NWS 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013):

$$V_i = \{v(\Delta t_i), \theta(\Delta t_i), hr(\Delta t_i) \mid v(\Delta t_i) > 4, \theta(\Delta t_i) \in [0,90], hr(\Delta t_i) < 40, \Delta t_i = (t_{i+a} - t_i) > 3\}, \quad (1)$$

donde V_i es la magnitud de la velocidad del viento, $v(\Delta t_i)$ es la magnitud de la velocidad del viento en metros por segundo, $\theta(\Delta t_i)$ es la dirección del viento en grados sexagesimales, $hr(\Delta t_i)$ es la humedad relativa en porcentaje, t_{i+a} es el límite superior del intervalo de tiempo, t_i es el límite inferior y Δt_i es un intervalo de tiempo superior a 3 h.

Una vez filtrados los datos, se realizaron diferentes clasificaciones tomando como referencia los datos obtenidos a través de la estación meteorológica y del centro de alta

(a) *Classification based on the magnitude of the average wind speed with 2 different categories*

The sample of SAWs identified with set (1) was classified using ranges of the average wind magnitude (Data 1: ranges in intervals of $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) according to the SAW regional index (SAWRI) by Guzman-Morales et al. (2016), which includes weak SAWs ($<5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), moderate SAWs ($5\text{--}10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), and extreme SAWs ($10\text{--}15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). In addition, the category used for the Jet Propulsion Laboratory model applied by the National Aeronautics and Space Administration (NASA, USA) in the QuickScat Project (2003) was used, with values of $4\text{--}6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for weak SAWs, $6\text{--}8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for moderate SAWs, and $>8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for strong SAWs (Data 2: ranges in intervals of $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

(b) *Dimensionless analysis based on atmospheric pressure, air density, and the maximum value of the magnitude of the wind speed*

The objective of the dimensionless classification was to correlate the variables of pressure, wind speed magnitude, and air density for all SAW events and compare “weak”, “moderate,” and “strong” winds. This classification was made using the dimensionless parameter, I_D (equation 2), derived from the momentum equation, and was calculated as follows:

$$I_D = \frac{(P_H - P_{local}) \times t_e}{\rho D (V_{gust} - V_{i,mean})}, \quad (2)$$

where P_H is the value of the pressure shown at the high-pressure center over the Great Basin from the synoptic maps, P_{local} is the value of atmospheric pressure recorded in La Rumorosa area on the NOAA synoptic maps, D is the distance obtained through Google Earth between the points P_H and P_{local} , V_{gust} is the magnitude of the gust speed, $V_{i,mean}$ is the magnitude of the average wind speed, and t_e is the duration of the event (values measured on the surface of La Rumorosa by CONAGUA). Air density, ρ , was obtained with surface values from CONAGUA using the following equation:

$$\rho = \frac{P_{local,m}}{RT}, \quad (3)$$

where $P_{local,m}$ is the local maximum pressure during an event, R is the ideal gas constant, with a value of $0.2870 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$, and T is the maximum average temperature recorded in all events per year.

(c) *Classification using normalization on average velocity magnitude, gust velocity magnitude, and pressure gradient*

With the sample of SAW events obtained with set (1), the average magnitude of the wind speed, the magnitude of the gust speed (measured on the surface by CONAGUA), and the pressure gradient were normalized to obtain a “weak”,

presión formado en la Gran Cuenca. Se identificaron eventos de acuerdo con esta clasificación en el mismo día, hasta en 2 ocasiones, y por el tratamiento de la información, se presentaron en función de la cantidad total de tiempo de los eventos de Santa Ana; es decir, sí para el año 2005 se contabilizaron un total de 22 eventos, con el análisis en tiempo, sería la presencia de 12 días de VSA en el año.

(a) *Clasificación basada en la magnitud de la velocidad promedio del viento con 2 categorías distintas*

A la muestra de VSA identificados con el conjunto (1) se le aplicó la clasificación utilizando rangos de la magnitud promedio del viento (Datos 1: rangos de 5 en $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) de acuerdo con el índice regional de VSA (SAWRI, por sus siglas en inglés) de Guzman-Morales et al. (2016), el cual comprende VSA débiles, $<5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; VSA moderados, $5\text{--}10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; y VSA extremos ($10\text{--}15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Además, se usó la categoría utilizada para el modelo del Laboratorio de Propulsión a Chorro aplicado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, E.E. U.U.) en QuickScat Project (2003), con valores de $4\text{--}6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para débil, $6\text{--}8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para moderado y $>8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para fuerte (Datos 2: rangos de 2 en $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

(b) *Análisis adimensional basado en la presión atmosférica, la densidad del aire y el valor máximo de la magnitud de la velocidad del viento*

El objetivo de la clasificación adimensional fue relacionar las variables de presión, magnitud de la velocidad del viento y densidad del aire para todos los eventos de VSA y presentar una comparación para vientos “débiles”, “moderados” y “fuertes”. Esta clasificación se realizó utilizando el parámetro adimensional, I_D (ecuación 2), derivado de la ecuación de momento, y se calculó de la siguiente manera:

$$I_D = \frac{(P_H - P_{local}) \times t_e}{\rho D (V_{ráfaga} - V_{i,medio})}, \quad (2)$$

donde P_H es el valor mostrado de la presión en el centro de alta presión sobre la Gran Cuenca de los mapas sinópticos, P_{local} es el valor de presión atmosférica registrado en la zona de La Rumorosa en los mapas sinópticos de la NOAA, D es la distancia obtenida a través de Google Earth entre los puntos P_H y P_{local} , $V_{ráfaga}$ es la magnitud de la velocidad de ráfaga, $V_{i,medio}$ es la magnitud de la velocidad promedio del viento y t_e es la duración del evento (valores medidos en la superficie de La Rumorosa por CONAGUA). La densidad del aire, ρ , fue obtenida con valores de superficie de CONAGUA mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P_{local,m}}{RT}, \quad (3)$$

donde $P_{local,m}$ es la presión máxima local durante un evento, R es la constante del gas ideal, cuyo valor es de

“moderate,” and “strong” classification. The pressure gradient was normalized using the following equation:

$$P_{\text{gradient}_{\text{norm}}} = \frac{P_{\text{gradient}}}{P_{\text{gradient}_{\text{max}}}}, \quad (4)$$

where $P_{\text{gradient}_{\text{norm}}}$ is the normalized value of the pressure gradient, P_{gradient} is the pressure gradient for each SAW event ($P_H - P_{\text{local}}$), and $P_{\text{gradient}_{\text{max}}}$ is the maximum value of the pressure gradient.

Considering the parameter I_D as linear and divided into 3 intervals, and the dimensionless (item *b*) and normalization (item *c*) classifications, we proposed weak SAWs for values of 0.00–0.33, moderate SAWs for values of 0.33–0.66, and strong SAWs for values of 0.66–1.00.

RESULTS

The classification of SAW events obtained by applying the previously defined criteria to set (1) is shown in Figure 2. The results show a cumulative value of 20 ± 4 d of SAWs per year. In addition, in each of the years studied, SAW events had the longest duration in January. In addition, in the years 2008, 2011, and 2014, events occurred in May, which is consistent with the reports by Hsu et al. (2007).

Figure 3 shows the behavior of SAWs for the study period, with a minimum of 12 d in 2005 and a maximum of 29 d in 2008. Figure 4 shows the classification based on the magnitude of the average speed of the wind ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) with categories based on the range divided in intervals of $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; this are shown as “weak” (4 to $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), “moderate” (6 to $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), and “strong” ($>8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), according to the QuickScat Project (2003) ranges.

SAW event classifications were compared using the different variables proposed in the classifications mentioned in the *Materials and methods* section (Table 2). Figure 5 shows the normalized data of the magnitude of the average wind speed, the magnitude of the gust speed, and the pressure gradient for all the VSA events registered in the period from 2005 to 2014. This analysis was done to identify the relationship between the variables of pressure and magnitude of the average wind speed in La Rumorosa, and it showed that the greater the value of the pressure gradient, the greater the magnitude of the average wind speed. We show here the graph of the behavior of the variables in the presence of SAWs by year as a function of gust speed.

DISCUSSION

The proposed methodology supported by previous regional studies allows following an empirical model based on surface measurements and supported by synoptic scale maps, which contributes significantly to the understanding of local atmospheric dynamics in the northern area of Baja California, Mexico.

$0.2870 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$, y T es la temperatura promedio máxima registrada en todos los eventos por año.

(c) *Clasificación utilizando la normalización en la magnitud de la velocidad promedio, la magnitud de la velocidad de ráfaga y el gradiente de presión*

De la muestra de los eventos de VSA obtenidos con el conjunto (1), se normalizaron el promedio de la magnitud de la velocidad del viento, la magnitud de la velocidad de ráfaga de viento (medida en superficie por CONAGUA) y el gradiente de presión para obtener una clasificación “débil”, “moderada” y “fuerte”. El gradiente de presión se normalizó utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{\text{gradiente}_{\text{norm}}} = \frac{P_{\text{gradiente}}}{P_{\text{gradiente}_{\text{max}}}}, \quad (4)$$

donde $P_{\text{gradiente}_{\text{norm}}}$ es el valor normalizado del gradiente de presión, $P_{\text{gradiente}}$ es el gradiente de presión para cada evento de VSA ($P_H - P_{\text{local}}$) y $P_{\text{gradiente}_{\text{max}}}$ es el valor máximo del gradiente de presión.

Considerando el parámetro I_D como lineal y dividido en 3 intervalos, así como la clasificación adimensional (inciso *b*) y la clasificación de normalización (inciso *c*), se propusieron VSA débiles para valores de 0.00–0.33, VSA moderados para valores de 0.33–0.66 y VSA fuertes para valores de 0.66–1.00.

RESULTADOS

La clasificación de los eventos de VSA que se obtuvo al aplicar los criterios definidos previamente sobre el conjunto (1) se presenta en la Figura 2. Los resultados muestran un valor acumulado de 20 ± 4 d de VSA por año. Además, se observó que en enero se presentaron los eventos de VSA con mayor duración en cada uno de los años estudiados. También, se identificó que, en los años 2008, 2011 y 2014, existieron eventos en mayo que concuerdan con lo reportado en el estudio de Hsu et al. (2007).

En la Figura 3 se identificó el comportamiento de los VSA en el periodo de estudio, con un mínimo de 12 d en 2005 y un máximo de 29 d en 2008. En la Figura 4 se presenta la clasificación basada en la magnitud de la velocidad promedio del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) con la categoría de 2 en $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, y se muestra como “débil” (4 a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), “moderada” (6 a $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y “fuerte” ($>8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), según los rangos de QuickScat Project (2003).

Se compararon los resultados para las clasificaciones de eventos de VSA utilizando las diferentes variables propuestas en las clasificaciones mencionadas en la sección de *Materiales y métodos* (Tabla 2). En la Figura 5 se presenta una gráfica con los datos normalizados de la magnitud de la velocidad promedio del viento, la magnitud de la velocidad de ráfaga y el gradiente de presión para todos los eventos de VSA registrados en el periodo de 2005 a 2014. En este

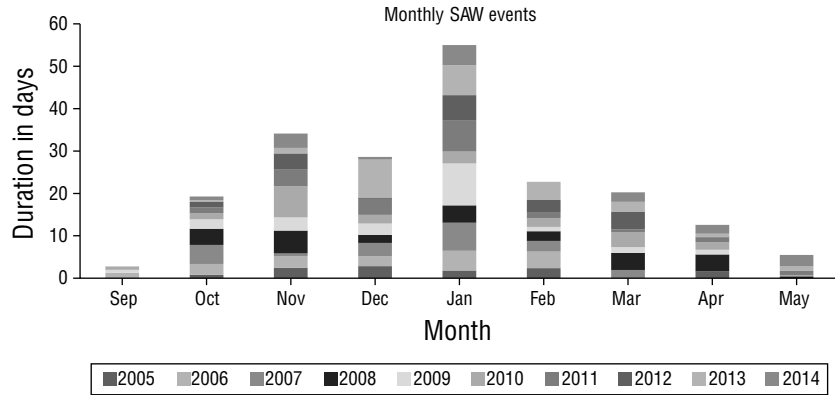


Figure 2. Days with Santa Ana wind (SAW) events at La Rumorosa weather station during the 2005–2014 period, with dataset (1).

Figura 2. Días con eventos de vientos de Santa Ana (SAW, por sus siglas en inglés) en la estación meteorológica de La Rumorosa durante el periodo 2005 a 2014, con datos del conjunto (1).

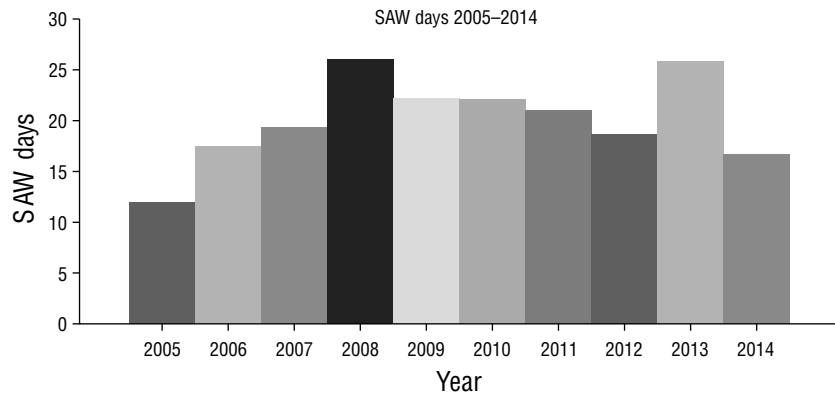


Figure 3. Santa Ana wind (SAW) days per year at La Rumorosa automatic weather station.

Figura 3. Días de vientos Santa Ana (SAW, por sus siglas en inglés) por año en la estación meteorológica automática La Rumorosa.

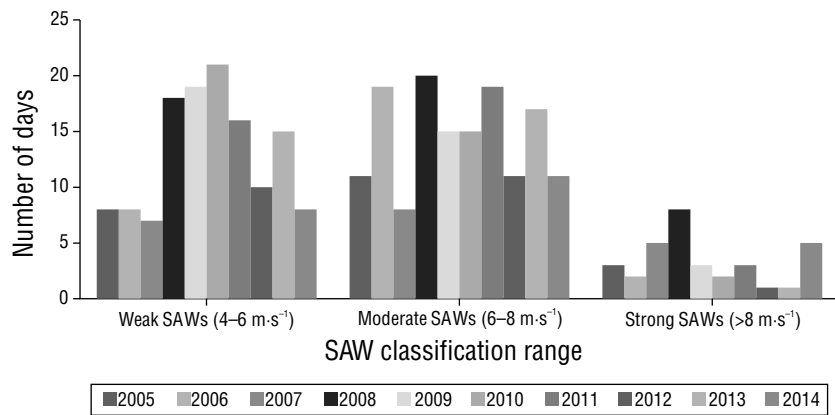


Figure 4. Classification of Santa Ana wind (SAW) events in La Rumorosa, with the QuickScat Project (2003) ranges of the magnitude of wind speed with intervals of 2 m·s⁻¹.

Figura 4. Clasificación de los eventos de vientos Santa Ana (SAW, por sus siglas en inglés) en La Rumorosa, con los rangos de la magnitud de la velocidad del viento de 2 en 2 m·s⁻¹ de QuickScat Project (2003).

Table 2. Comparison of the results of the classification of the Santa Ana winds in La Rumorosa.

Tabla 2. Comparación de los resultados de la clasificación de los vientos Santa Ana en La Rumorosa.

Classification	Weak	Moderate	Strong
(a) Class range classification using the average wind speed magnitude from Guzman-Morales et al. (2016). Vm (m·s ⁻¹): <5, 5–10, 10–15	7.79%	91.88%	0.32%
Class range classification using the average wind speed magnitude from QuickScat Project (2003). Vm (m·s ⁻¹): 4–6, 6–8, >8	42.10%	47.20%	10.70%
(b) Dimensionless classification (equation 2) <0.33, 0.33–0.66, >0.66	37.93%	47.93%	14.14%
(c) Normalized wind speed magnitude classification (equation 4) <0.33, 0.33–0.66, >0.66	32.76%	57.24%	10.00%

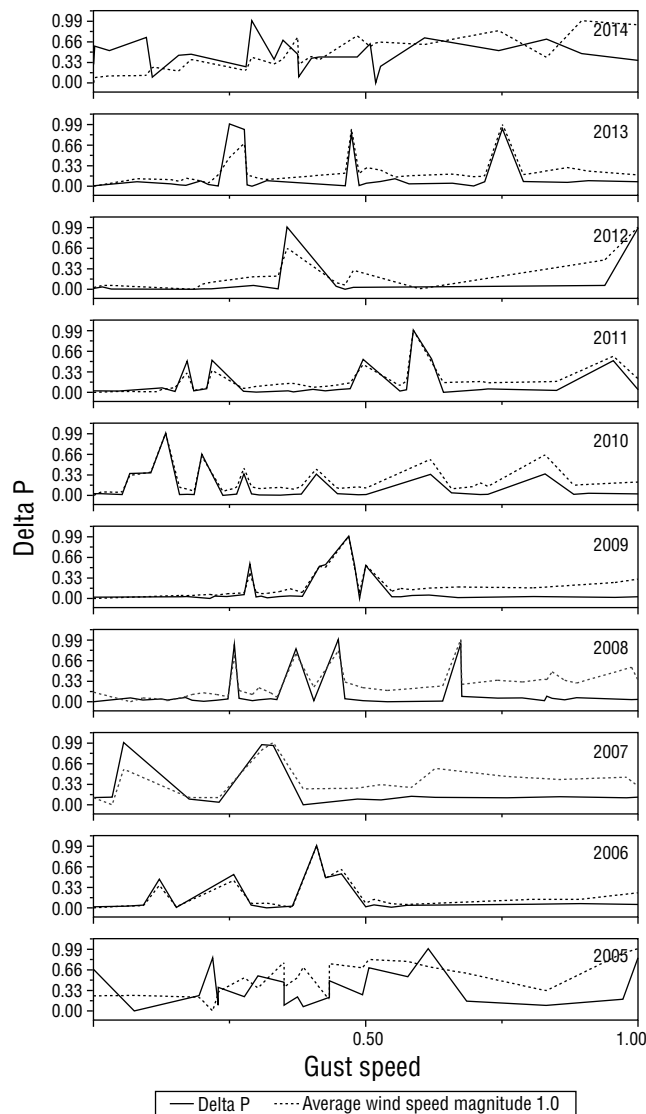


Figure 5. Normalized values of the magnitude of the average wind speed and the normalized pressure differential at La Rumorosa weather station during the period from 2005 to 2014.

Figura 5. Valores normalizados de la magnitud de velocidad promedio del viento y el diferencial de presión normalizado en la estación meteorológica de La Rumorosa durante el periodo 2005-2014.

The classification obtained in this study can serve as a basis for establishing a relationship between SAWs and their effect on primary productivity in the Gulf of California and the coastal region of the California Current in the areas influenced by SAWs.

This information can be used by companies that have installed wind turbines in the area of La Rumorosa for their operational purposes during the presence of SAWs, whose incidence, according to our results, is highest during January.

According to the studies reviewed, SAW events are winds that occur from September to April, most frequently in December. However, in this work, we identified that this phenomenon also happened in May in the years 2008, 2011, and 2014.

In the proposed classification for SAW events in La Rumorosa, the magnitude of the velocity of occurrence considered was $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. SAW events here behaved in a similar manner to those reported in studies in southern California, with corresponding variables of wind direction, relative humidity, and atmospheric pressure; this was not observed for the magnitude of the wind speed in La Rumorosa, which reached only up to 14% of strong events (classification *b*).

The wind classification shown in Table 2, with the exception of the range in intervals of $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, differ for the SAW categories from 4% to 9% for weak, from 1% to 10% for moderate, and from 1% to 4% for strong. Between 86% and 90% of classifications were weak and moderate SAWs, and 58% to 67% were moderate and strong, which directly impact the generation of electric wind power through the wind turbines placed in the region.

This confirms that the presence of SAW events increases the wind potential available in the region of La Rumorosa. According to a previous study, wind energy harnessing associated with these SAW events for the year 2012 represented 10% of the total wind production in a turbine of the wind farm La Rumorosa I (Zamora 2016).

Based on the obtained results, it is estimated that SAW events reach this region of Baja California with less strength. This can be attributed to natural obstacles, such as mountains and uneven terrain, that decrease their speed on their way to the Pacific coast. Understanding the dynamics of these winds is essential given the growth in the energy sector projected for La Rumorosa, that is, given the future installation of wind farms and the operation of current ones (NADB 2013, CEE 2017, IEnova 2022). Consequently, knowing the behavior and occurrence of these winds allows wind power plants to make management and projection decisions.

The methodology used in this study could be applied to other regions influenced by SAWs, such as the border region between Baja California and Southern California, where there are wind farms on both sides of the border: in the municipalities of Ensenada and Tecate in Mexico, and in Imperial, San Diego, and Riverside counties in the United States. Riverside County has one of the most important areas for harnessing wind power, the area of Palm Springs. Therefore,

análisis para identificar la relación entre las variables de presión y magnitud de la velocidad promedio del viento en La Rumorosa, se observó que a mayor valor del gradiente de presión, mayor magnitud de velocidad promedio del viento. Se muestra el gráfico del comportamiento de las variables en presencia de los VSA por año en función de la velocidad de la ráfaga.

DISCUSIÓN

La metodología propuesta sustentada en estudios regionales previos permite seguir un modelo empírico basado en mediciones de superficie y apoyado con mapas de escala sinóptica, lo que contribuye significativamente al entendimiento de la dinámica atmosférica local en la zona norte de Baja California, México.

La clasificación obtenida en este estudio puede servir de base para establecer una relación entre los VSA y su efecto en la productividad primaria en el golfo de California y la región costera de la corriente de California en las áreas de influencia de los VSA.

Esta información puede ser utilizada por empresas que hayan instalado aerogeneradores en la zona de La Rumorosa para sus fines operativos durante la presencia de los VSA, que, de acuerdo con nuestros resultados, su mayor incidencia es durante enero.

Según los estudios revisados, los eventos de VSA son vientos con ocurrencia de septiembre a abril, con mayor frecuencia en diciembre. Sin embargo, en este trabajo, identificamos que este fenómeno también sucedió en mayo en los años 2008, 2011 y 2014.

En la clasificación propuesta para los eventos de VSA en La Rumorosa, la magnitud de la velocidad de ocurrencia considerada fue de $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Los eventos de VSA se comportan de manera similar a los referidos en estudios en el sur de California, en sus variables de dirección del viento, humedad relativa y presión atmosférica, a excepción de la magnitud de la velocidad del viento en La Rumorosa que alcanza sólo hasta el 14% de eventos fuertes (clasificación *b*).

Los resultados sobre la clasificación de los vientos presentados en la Tabla 2, a excepción del rango de 5 en $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, difieren para las categorías de VSA del 4% al 9% para débil, del 1% al 10% para moderado y del 1% al 4% para fuerte. Entre el 86% y 90% de las clasificaciones son VSA débiles y moderados, y del 58% al 67% son moderados y fuertes, los cuales impactan directamente en la generación de energía eólica eléctrica a través de los aerogeneradores colocados en la región.

Lo anterior confirma que la presencia de los eventos de VSA aumenta el potencial eólico disponible en la región de La Rumorosa. De acuerdo con un estudio previo, la producción de energía eólica asociada con dichos eventos de VSA para el año 2012 representó el 10% de la producción eólica total en una turbina del parque eólico La Rumorosa I (Zamora 2016).

the relevance of this study to understand the dynamics of the winds and their energy contribution lies in processing the information from the databases to obtain mathematical models for the prediction of wind energy in the short term.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Comisión Nacional del Agua (Mexico) for obtaining meteorological data for the study and the Autonomous University of Baja California.

English translation by Claudia Michel-Villalobos.

REFERENCES

- Abatzoglou JT, Barbero R, Nauslar NJ. 2013. Diagnosing Santa Ana winds in Southern California with synoptic-scale analysis. *Weather Forecast*. 28(3):704-710. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00002.1>
- Ackerman S, Knox J. 2011. *Meteorology*. Kendallville (IN): Jones & Bartlett Publishers. 577 p.
- Álvarez CA, Carbajal N. 2019. Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Qual Atmos Health*. 12(9):1019-1034. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00719-3>
- Álvarez CA, Carbajal JN, Pineda-Martínez LF, Tuxpan J, Flores DE. 2020. Dust deposition on the gulf of California caused by Santa Ana winds. *Atmosphere*. 11(3):275. <https://doi.org/10.3390/atmos11030275>
- Bytnerowicz A, Cayan D, Riggan P, Schilling S, Dawson P, Tyree M, Wolden L, Tissell R, Preisler H. 2010. Analysis of the effects of combustion emissions and Santa Ana winds on ambient ozone during the October 2007 southern California wildfires. *Atmos Environ*. 44(5):678-687. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.014>
- Cao Y, Fovell RG. 2013. Predictability and sensitivity of downslope windstorms in San Diego County. In: Lane T, Epifanio C (eds.), *15th Conference on Mesoscale Processes: 2013 August 6-9, Portland, Oregon, United States of America*. Portland (OR), p. 1-9.
- Castro R, Mascarenhas A, Martínez-Díaz-de-León A, Durazo R, Gil-Silva E. 2006. Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California Peninsula. *Atmósfera*. 19(3):195-211. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8560>.
- Castro R, Parés-Sierra A, Marinone SG. 2003. Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California = Evolution and extension of the Santa Ana winds of February 2002 over the ocean, off California and the Baja California Peninsula. *Cienc Mar*. 29(3):275-281. <https://doi.org/10.7773/cm.v29i3.158>
- [CICESE] Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 2003. Zonas Potencialmente Productoras de Energía Eólica en Baja California, México [Potential Wind Energy Production Zones in Baja California, Mexico]. Ensenada (Mexico): CICESE. 51 p.
- [CEE] Comisión Estatal de Energía. 2017. Lo que hacemos: proyectos en operación [What we do: projects in operation]. Mexicali (Mexico): CEE; [accessed 2022 Oct 06]. <http://www.energiabc.gob.mx/>.
- [CONAGUA] Comisión Nacional del Agua. 2022. Sistema de Información y Visualización de Estaciones Automáticas [Information and Visualization System of Automatic Stations]. Mexico City (Mexico): CONAGUA; [accessed 2022 Oct 10]. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>.
- Conil S, Hall A. 2006. Local regimes of atmospheric variability: A case study of Southern California. *J Clim*. 19(17):4308-4325. <https://doi.org/10.1175/JCLI3837.1>
- Félix-Bermúdez A, Delgadillo-Hinojosa F, Huerta-Díaz MA, Camacho-Ibar V, Torres-Delgado EV. 2017. Atmospheric inputs of iron and manganese to coastal waters of the southern California Current System: Seasonality, Santa Ana winds, and biogeochemical implications. *J Geophys Res Oceans*. 122(11):9230-9254. <https://doi.org/10.1002/2017JC013224>
- Fovell RG, Cao Y. 2017. The Santa Ana winds of southern California: Winds, gusts, and the 2007 witch fire. *Wind Struct*. 24(6):529-564. <https://doi.org/10.12989/was.2017.24.6.529>
- Gershunov A, Guzman-Morales J, Hatchett B, Guirguis K, Aguilera R, Shulgina T, Abatzoglou JT, Cayan D, Pierce D, Williams P, et al. 2021. Hot and cold flavors of southern California's Santa Ana winds: their causes, trends, and links with wildfire. *Clim Dyn*. 57(7):2233-2248. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05802-z>
- Glickman TS, Zenk W. 2000. *Glossary of meteorology*. Boston (MA): American Meteorological Society. 855 p.

Con base en los resultados obtenidos, se estima que los eventos de VSA llegan a esta región de Baja California con menor fuerza. Esto puede atribuirse a obstáculos naturales, como montañas y terrenos irregulares, que disminuyen su velocidad en su camino hacia la costa del Pacífico. Comprender la dinámica de estos vientos es imprescindible debido al crecimiento en el sector energético proyectado para La Rumorosa, es decir, dada la futura instalación de parques eólicos y la operación de los actuales (NADB 2013, CEE 2017, IEnova 2022). En consecuencia, conocer el comportamiento y ocurrencia de estos vientos permite a las plantas de energía eólica tomar decisiones de gestión y proyección.

La metodología utilizada en el presente estudio podría aplicarse a otras regiones influenciadas por los VSA, tales como la región fronteriza entre Baja California y el Sur de California, donde existen parques eólicos en ambos lados de la frontera; en los Municipios de Ensenada y Tecate en México; y en los condados de Imperial, San Diego y Riverside en Estados Unidos. En este último se encuentra una de las zonas más importantes en la generación de energía eólica, la zona de Palm Springs. Por lo que la relevancia de este estudio para entender la dinámica de los vientos y su aporte energético radica en procesar la información de las bases de datos para obtener los modelos matemáticos de predicción de la energía eólica a corto plazo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua (México) la obtención de datos meteorológicos para el estudio, así como a la Universidad Autónoma de Baja California.

- Guzman-Morales J, Gershunov A, Theiss J, Li H, Cayan D. 2016. Santa Ana Winds of Southern California: Their climatology, extremes, and behavior spanning six and a half decades. *Geophys Res Lett.* 43(6):2827-2834. <https://doi.org/10.1002/2016GL067887>
- Hatchett BJ, Smith CM, Nauslar NJ, Kaplan ML. 2018. Brief communication: Synoptic-scale differences between Sundowner and Santa Ana wind regimes in the Santa Ynez mountains, California. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 18(2):419-427. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-419-2018>
- Hsu HM, Oey LY, Johnson W, Dorman C, Hodur R. 2007. Model wind over the central and southern California coastal ocean. *Mon Weather Rev.* 135(5):1931-1944. <https://doi.org/10.1175/MWR3389.1>
- Hu H, Liu WT. 2003. Oceanic thermal and biological responses to Santa Ana winds. *Geophys Res Lett.* 30(11):1596-1599. <https://doi.org/10.1029/2003GL017208>
- Hughes M, Hall A. 2010. Local and synoptic mechanisms causing Southern California's Santa Ana winds. *Clim Dyn.* 34(6):847-857. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0650-4>
- Hughes M, Hall A, Kim J. 2009. Anthropogenic reduction of Santa Ana winds. Sacramento (USA): California Climate Change Center. 29 p.
- [IEnova] Infraestructura Energética Nova. Our company: our Assets; c2022. Mexico City (Mexico); [accessed 2022 Oct 10]. <https://www.ienova.com.mx/activos.php>.
- [INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2022. Mapa Digital de México [Digital Map of Mexico]. Mexico City (Mexico): INEGI; [accessed 2022 Oct 10]. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>.
- Jin Y, Randerson JT, Faivre N, Capps S, Hall A, Goulden ML. 2014. Contrasting controls on wildland fires in Southern California during periods with and without Santa Ana winds. *J Geophys Res Biogeosci.* 119(3):432-450. <https://doi.org/10.1002/2013JG002541>
- Jones C, Fujioka F, Carvalho LMV. 2010. Forecast skill of synoptic conditions associated with Santa Ana winds in Southern California. *Mon Weather Rev.* 138(12):4528-4541. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3406.1>
- Keeley JE, Fotheringham CJ, Moritz MA. 2004. Lessons from October 2003. Wildfires in Southern California. *J For.* 102(7):26-31.
- Langford AO, Pierce RB, Schultz PJ. 2015. Stratospheric intrusions, the Santa Ana winds, and wildland fires in Southern California. *Geophys Res Lett.* 42(14):6091-6097. <https://doi.org/10.1002/2015GL064964>
- Miller NL, Schlegel NJ. 2006. Climate change projected fire weather sensitivity: California Santa Ana wind occurrence. *Geophys Res Lett.* 33(15):1-5. <https://doi.org/10.1029/2006GL025808>
- Navarro-Olache LF, Castro R, Durazo R, Hernández-Walls R, Mejía-Trejo A, Flores-Vidal X, Flores-Morales AL. 2020. Influence of Santa Ana winds on the surface circulation of Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Atmósfera.* 34(1):97-109. <https://doi.org/10.20937/ATM.52719>
- [NADB] North American Development Bank. 2013. Energía Sierra Juárez Proyecto de Energía Eólica Primera fase Municipio de Tecate, Baja California [Energy Sierra Juárez Wind Energy Project First Phase Municipality of Tecate, Baja California]. Tecate (Mexico): NADB; [accessed 2022 Oct 10]. <https://www.nadb.org/es/nuestros-proyectos/proyectos-de-infraestructura/energia-sierra-juarez-proyecto-de-energia-eolica-primera-fase-municipio-de-tecate-baja-california>.
- [NWS] National Weather Service. 2005. Weather Map Archive: Surface Analysis Map 2005. Fort Collins (USA): Colorado State University; [accessed 2022 Oct 10]. <http://archive.atmos.colostate.edu/data/sfc/QYAA00/0501/>.
- [NWS] National Weather Service. 2006. Weather Map Archive: Surface Analysis Map 2006. Fort Collins (USA): Colorado State University; [accessed 2022 Oct 10]. <http://archive.atmos.colostate.edu/data/sfc/QYAA00/0601/>.
- [NWS] National Weather Service. 2007. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive October 22, 2007. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.
- [NWS] National Weather Service. 2008. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive October 22, 2008. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.php?arcdte=01/01/2008&selmap=2008010100&maptype=all.
- [NWS] National Weather Service. 2009. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive January 06, 2008. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.php?arcdte=01/01/2009&selmap=2009010100&maptype=all.
- [NWS] National Weather Service. 2010. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive February 16, 2010. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.php?arcdte=01/01/2010&selmap=2010010100&maptype=all.
- [NWS] National Weather Service. 2011. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive February 09, 2011. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.php?arcdte=01/01/2011&selmap=2011010100&maptype=all.
- [NWS] National Weather Service. 2012. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive March 21, 2012. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10]. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive_maps.php?arcdte=01/01/2012&selmap=2012010100&maptype=all.
- [NWS] National Weather Service. 2013. Weather Prediction Center: WPC Surface Analysis Archive October 17, 2013. Maryland (USA): National Oceanic and Atmospheric Administration; [accessed 2022 Oct 10].
- QuickScat Project. 2003. Santa Ana Wind Event Over California. La Cañada Flintridge (USA): NASA Jet Propulsion Laboratory; [accessed 2022 Oct 10]. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/10729>.
- Raphael MN. 2003. The Santa ana winds of California. *Earth Interact.* 7(8):1-13. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:TSAWOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:TSAWOC>2.0.CO;2)
- Raphael M, Finley J. 2007. The relationship between El Niño and the duration and frequency of the Santa Ana winds of Southern California. *Prof Geogr.* 59(2):184-192. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9272.2007.00606.x>
- Rolinski T, Capps SB, Zhuang W. 2019. Santa Ana Winds: A Descriptive Climatology. *Weather Forecast.* 34(2):257-275. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0160.1>
- Serpa-Usta Y, López-Lambrano AA, Flores DL, Gámez-Balmaceda E, Martínez-Acosta L, Medrano-Barboza JP, Remolina-López JF, López-Ramos A, López-Lambrano M. 2021. Santa Ana

- Winds: Fractal-Based Analysis in a Semi-Arid Zone of Northern Mexico. *Atmosphere*. 13(1):48.
<https://doi.org/10.3390/atmos13010048>
- Small IJ. 1995. Santa Ana winds and the fire outbreak of fall 1993. Memorandum Technical NWS WR-230. Oxnard (CA): National Weather Service Forecast Office. 56 p.
- Sommers WT. 1978. LFM forecast variables related to Santa Ana wind occurrences. *Mon Weather Rev*. 106(9):1307-1316.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106<1307:LFVRTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<1307:LFVRTS>2.0.CO;2)
- Sosa-Avalos R, Gaxiola-Castro G, Durazo R, Mitchell BG. 2005. Effect of Santa Ana winds on bio-optical properties off Baja California = Efecto de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California. *Cienc Mar*. 31(2):339-348.
<http://dx.doi.org/10.7773/cm.v31i2.60>
- Trasviña A, Ortiz-Figueroa M, Herrera H, Cosío MA, González E. 2003. 'Santa Ana' winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dyn Atmos Oceans*. 37(2):113-129.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(03\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(03)00018-6)
- Westerling AL, Cayan DR, Brown TJ, Hall BL, Riddle LG. 2004. Climate, Santa Ana winds and autumn wildfires in southern California. *Eos Trans AGU*. 85(31):289-296.
<https://doi.org/10.1029/2004EO310001>
- Zamora M. 2016. Variabilidad del potencial eólico y su relación con fenómenos meteorológicos en Baja California [Variability of wind potential and its relationship with meteorological phenomena in Baja California] [dissertation]. Mexicali (Mexico): Universidad Autónoma de Baja California. 113 p.