

# Análisis comparativo de tecnologías sustitutivas para la medición del potencial eólico en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur

*Comparative analysis of substitute technologies for the measurement of wind potential in the facilities of the Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur*

Sergio A. López  \*

Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur, Universidad de San Carlos de Guatemala

\*Autor al que se dirige la correspondencia: [sergio.lopez@profesor.usac.edu.gt](mailto:sergio.lopez@profesor.usac.edu.gt)

Recibido: 18 de abril 2023 / Revisión: 19 de abril 2024 / Aceptado: 27 de mayo 2024

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el análisis comparativo de tecnologías sustitutivas para la medición del potencial eólico en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur. Para esto se realizaron mediciones de la rapidez y dirección del viento, con tres sistemas tecnológicos independientes denominados por mástil, que se consideró como sistema de referencia, por elevación con el uso de un dron y por elevación con globos inflados con helio. Se utilizaron anemómetros de cazoletas en cada sistema a 10 y 15 m de altura, con frecuencias de medición de 5 min para el sistema por dron y mástil, además, 4 min para el sistema elevado por globos, la dirección del viento se consideró igual en todos los sistemas basados en los datos del mástil. Se realizaron comparaciones con el uso de pruebas de diferencias entre medias, gráficas lineales y rosas de viento. Los resultados muestran 68.75% de igualdad entre las medias del sistema por mástil y elevado por dron, además, un 40% de igualdad entre las medias del sistema por mástil y elevado por globo. El potencial eólico resultante durante el periodo de experimentación fue de 0.94041 W/m<sup>2</sup>. Se concluye que, para la medición del potencial eólico el sistema por mástil es el más confiable, debido a su capacidad de continuidad en la medición a largo plazo, ya que el uso del dron y los globos poseen carencias de energización y sustentabilidad respectivamente.

Palabras clave: Anemómetro de cazoleta, dron, globo, rosa de viento, rapidez del viento

## Abstract

The objective of this research is the comparative analysis of substitute technologies for measuring wind potential at the Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur. To achieve this, measurements of wind speed and direction were taken using three independent technological systems: a mast, which was considered the reference system, a drone, and helium-inflated balloons. Cup anemometers were used in each system at heights of 10 and 15 m, with measurement frequencies of 5 min for the drone and mast systems, and 4 min for the balloon system. Wind direction was considered consistent across all systems based on mast data. Comparisons were made using mean difference tests, line graphs, and wind roses. The results show a 68.75% similarity between the means of the mast and drone systems, and a 40% similarity between the means of the mast and balloon systems. The resulting wind potential during the experimental period was 0.94041 W/m<sup>2</sup>. It is concluded that, for measuring wind potential, the mast system is the most reliable due to its capacity for continuous long-term measurement, as the use of drones and balloons has deficiencies in energy supply and sustainability, respectively.

Keywords: cup anemometer, drone, balllon, wind rose, wind speed



## Introducción

El viento y su presencia como recurso para la generación de energías limpias ha presentado la posibilidad de su explotación a nivel mundial y cada vez más se requiere de este tipo de energías, con el objetivo de frenar los impactos del cambio climático por consumo de combustibles fósiles en generación de energía eléctrica (Vega de Kuper & Ramírez Morales, 2014).

La posibilidad de aprovechar la energía del viento necesita de una transformación. Una máquina denominada generador eólico ofrece la posibilidad de transformar la energía cinética del viento en electricidad, cuando esta es tomada de una turbina eólica (Moro Vallina, 2013).

Estas máquinas son diversas y tienen modelos específicos según el sitio donde se deseen instalar, esto se debe en gran medida a que el viento presenta mucha variabilidad en su magnitud, dirección y frecuencia, en dependencia directa del sitio donde se instale, la estación del año que esté presente y las condiciones climáticas que gobiernan una región en particular (González-Rocha et al., 2019). Lo que conduce a que la generación de energía eólica requiere de unos estudios particulares previos a instalar un equipo de generación.

Cuando se desea evaluar el potencial eólico de un lugar conviene realizar una campaña de medición del viento (rapidez y dirección), lo más larga posible, técnica y económicamente posible, como mínimo de un año y llevar a cabo mediciones a distintas alturas (10, 25, 50, 80 m) mediante el uso de una torre meteorológica (López, 2012). El estudio de potencial eólico se refiere a un análisis prolongado de las condiciones o caracterización del viento en un sitio de interés. Se requiere de mediciones de la rapidez, dirección, frecuencia, altura y condiciones climáticas que gobiernen un sitio específico donde se desee realizar la instalación de una turbina eólica, estos estudios pueden durar meses o años, en dependencia del tipo de proyecto de generación que se requiera instalar en el lugar que se analiza (Asea Brown Boveri, 2012).

La potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área perpendicularmente al flujo del viento y al cubo de su velocidad. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría obtener del viento si se pudiera extraer del mismo toda su energía cinética. Debido a diversas limitaciones, límite de Betz, pérdidas aerodinámicas y mecánicas, rendimiento del generador eléctrico, entre otras, solo permiten en la práctica aprovechar como máximo alrededor de un 45% al 50% de la potencia eólica disponible (López, 2012).

De forma ordinaria el estudio de potencial eólico, se lleva a cabo con la instalación de un mástil con instrumentos de medición a diferentes alturas, durante un tiempo prudente que refleje con datos obtenidos, la caracterización del viento. Sin embargo, este tipo de instalaciones pueden ser dificultosas y costosas de instalar en varios sitios de interés para generación de energía eólica (Vasiljević et al., 2020).

Por este motivo es importante analizar opciones para realizar esta labor, ya que algunos lugares donde el viento es un recurso que cuenta con altas cantidades y calidades, como el mar abierto o laderas en colinas de perfil suave, no es posible la instalación de un mástil para monitoreo (Giebel et al., 2012).

La investigación que se presenta, explora la experimentación aplicada de dos sistemas de monitoreo diferentes, y su comparación con un sistema ordinario de tipo mástil, esto con la finalidad de demostrar la validez de otras opciones de monitoreo eólico. Uno de los sistemas, empleó el uso de un anemómetro montado sobre un dron a control remoto y el otro sistema, se basó en la elevación de un anemómetro por medio de globos inflados con helio. La dirección del viento se tomó de los datos del instrumento del mástil a 10 y 15 m de altura sobre el nivel de referencia, todos los anemómetros utilizados fueron de cazoletas. Con los datos obtenidos de los tres sistemas, se realizaron comparaciones de la información recolectada durante jornadas de monitoreo eólico simultáneas, con el uso de análisis e interpretación de gráficas lineales y rosas de viento. Además, como comparación estadística, se empleó la diferencia de medias. Se presentan al finalizar los resultados y la discusión de los mismos con otras investigaciones similares encontradas en la indagación bibliográfica sobre el tema.

## Materiales y Métodos

### Ubicación geográfica y temporalidad de la investigación/Obtención de información

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS, ubicado en el municipio de Palín departamento de Escuintla, a 14°22'26" N y 90°43'21" O, que puede observarse en la Figura 1, con una altura de 863 m sobre el nivel del mar, la temperatura promedio es de 23 °C, el promedio de lluvia es de 174 mm de marzo a diciembre y la dirección del viento puede tener mayoría de incidencia en las direcciones sur, norte y este (Weather Spark, 2023).

## Figura 1

### Mapa del sitio de medición



*Nota:* Google Earth (2023) Ubicación Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur <https://earth.google.com/web/@14.37337632,-90.72128957,988.59138873a,29.90782664d,35y,-68.77752262h,69.98747482t,0r/data=CgRCAGgB>

## Recolección de datos

La recolección de los datos se realizó en los meses de mayo, junio, julio y agosto del 2022. Los monitores del viento con los distintos sistemas se desarrollaron con base a la frecuencia de captura de información, la altura a la que se realizó la medición, las comparaciones entre los sistemas de tipo dron, tipo mástil y sistema elevado por globos inflados con helio. El dron empleado fue de marca DJI modelo Mavic 3 con la integración de un anemómetro PCE ADL 11. Para el sistema por mástil se utilizó un equipo PCE FWS 20, y en el sistema elevado por globos inflados con helio, se emplearon globos de latex de 90 cm de diámetro (inflado), con un anemómetro tipo PCE A420 sostenido por medio de una estructura de alambre. En todos los monitores se consideró la dirección del viento igual a la información obtenida del sistema tipo mástil, debido a la cercanía entre sistemas durante la medición. Las variables que se midieron fueron la rapidez y dirección del viento a alturas seleccionadas de 10 y 15 m, por motivos de factibilidad de montaje del mástil. Las pruebas de comparación del sistema de dron y mástil se llevaron a cabo los días 5, 7, 8, 9 y 19 de septiembre y los días 6, 7, 21, 26 y 27 de octubre, en horarios de

11 y 14 h, la prueba duro 25 min cada una, con una frecuencia de captura de datos cada 5 min, esto debido al mejor aprovechamiento del tiempo de vuelo del dron, ya que el mismo tiene una independencia de vuelo de 28 min como máximo, lo que dio la posibilidad de recolectar 5 datos por vuelo en vez de 2, que de forma ordinaria se consideran como tiempos adecuados para la captura de datos eólicos (10 min por cada captura). Las pruebas de comparación de los sistemas de mástil y globo, se desarrollaron los días 7 y 9 de septiembre, y 21, 26 y 27 de octubre, en horarios de 11 a 16 h.

Para la recuperación de los datos en cada medición, se descargaron los mismos a través de conexiones USB a una computadora portátil y por medio de lectura directa, como en el caso del sistema elevado por globos inflados con helio.

## Técnicas e instrumentos

El sistema por mástil se desarrolló a partir de la integración de varios elementos, tubería de aluminio de 3 y 2 in de diámetro, roscados en sus extremos y ensamblados con acoples. Para la transición de los tubos de distinto diámetro se empleó un conector

tipo campana de 3 pulgadas a 2 pulgadas y accesorios roscados. La elaboración del mástil se desarrolló bajo techo para luego ser instalado en el área seleccionada del estudio.

La base del mástil se fabricó con una placa cuadrada de acero de 30 cm de lado y 1.5 cm de espesor, se le soldó un acople tipo niple roscado de 3 pulgadas al centro de la placa para integrar los tubos. A la placa se le perforaron 6 agujeros que sirvieron para su instalación en el área establecida. A distancias de 6 y 9 m de la base del mástil, se colocaron cables de acero de 3/16 de pulgada de grosor y longitud de 10 y 14 m, alrededor de los tubos ensamblados. El apriete del cable se logró con cuatro mordazas por tensor, se instalaron tres tensores para la prueba de 10 m y seis tensores para la prueba de 15 m.

En el extremo del sistema, se instaló el equipo de monitoreo PCE FWS 20N, el cual cuenta con anemómetro de cazoletas, veleta para medición de dirección del viento, medidor de precipitación y termómetro. El rango para la medición de la rapidez del viento es de 0 a 50 m/s, con una resolución de 0.1 m/s y precisiones de  $\pm 1$  m/s para rapidezces menores a 5 m/s y  $\pm 10\%$  para rapidezces mayores a 5 m/s. Para la recepción y almacenamiento de las mediciones de los distintos sensores del equipo, se contó con una pantalla digital tipo *data logger*, misma que se ubicó en un recipiente plástico hermético a una distancia de 1.5 m de la base del mástil. La transmisión de la información para estos equipos es por medio de señal inalámbrica.

El segundo sistema desarrollado se basó en la integración de tres elementos, un dron a control remoto marca DJI modelo Mavic 3, una base de perfil de aluminio para la instalación del anemómetro, la cual fue acoplada al dron por medio de cinchos plásticos, y un anemómetro tipo cazoletas PCE ADL 11, mismo que fue acoplado a la base de aluminio por medio de un tornillo. La base de aluminio tiene forma de "L" con dimensiones de 10 por 12 cm. El anemómetro cuenta con las siguientes características, rango de 1.2 a 30.0 m/s, resolución 0.01 m/s y precisión de  $\pm 3\% + 0.20$  m/s. La ubicación del instrumento se determinó con base a pruebas de vuelo y se logró establecer que el mejor sitio era la parte frontal superior del dron, en esta ubicación se encuentra menos desequilibrio para la aeronave, ya que en la parte trasera se encuentra la batería, además, de reducir los efectos del viento vertical producto del funcionamiento de las hélices sobre el instrumento.

El tercer sistema desarrollado consistió en la unión de varios elementos poliméricos, se emplearon ocho globos de látex, de 90 cm de diámetro inflados con helio, sujetos con trozos de hilo de nylon a una línea de anclaje común. El hilo de nylon empleado fue de 1 mm, los acoples se realizaron por medio de nudos ordinarios, se emplearon dos tramos de hilo uno de 10 m de los globos hacia el anemómetro y otro de 10 o 15 m, según la necesidad de medición, del anemómetro hacia el punto de anclaje en el suelo. Para la medición de la rapidez del viento con este sistema se empleó un anemómetro PCE A420 de tipo cazoletas, el cual fue sujeto a la línea de anclaje de nylon por medio de una estructura de alambre de acero galvanizado, diseñada específicamente para la movilidad adecuada del instrumento en todo momento de funcionamiento, además, de permitir la verticalidad del anemómetro en independencia de la elevación de los globos. El instrumento cuenta con las siguientes características, rango de 0.9 a 35.0 m/s, resolución 0.1 m/s y precisión de  $\pm 2\% + 0.2$  m/s. Debido a que este instrumento es de captura de datos manual, se realizó una automatización al mismo con el uso de una tarjeta electrónica y un integrado 555, la configuración más estable se logró con una frecuencia de captura de 4 min. El anclaje en el suelo se realizó con un trozo de acero de construcción de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

## Procesamiento y análisis de información

Con los datos recuperados de cada uno de los sistemas de monitoreo se realizaron comparaciones con el uso de pruebas estadísticas de diferencia de medias y representaciones gráficas. Las pruebas estadísticas de diferencia de medias se realizaron con las herramientas de análisis de datos de MS Excel. Se hicieron pruebas de estadístico "t" de student para la información obtenida en las comparaciones de los sistemas por del dron y mástil, ya que son menores a 30 datos, y pruebas de estadístico "z" para la información obtenida en las comparaciones de las mediciones de los sistemas por mástil con el sistema de globos inflados con helio, ya que son mayores a 30; se utilizó un alfa de 0.05 en ambos casos. La hipótesis nula que se manejo fue que las medias de ambos sistemas son iguales.

También, se emplearon representaciones gráficas, con el uso de gráfica de líneas y el uso de rosas de viento, las cuales fueron elaboradas con MS Excel y WRPLOT (Thé, 2018) respectivamente.

## Resultados

Para la información analizada en los sistemas por mástil y sistema por dron, desde el 5 de septiembre hasta el 7 de octubre, las mediciones se realizaron a una altura de 10 m, del 21 al 26 de octubre a una altura de 15 metros. De las pruebas estadísticas de diferencia de medias se puede observar que existe igualdad en el 68.75 % de las comparaciones (véase Tabla 1).

Con la comparación en las gráficas lineales (Figura 2), es posible establecer que existieron diferencias de los datos recuperados con el sistema tipo dron respecto al sistema del mástil, cabe la posibilidad que esto se haya debido a diversos factores como, vibraciones inducidas por el funcionamiento ordinario del dron que repercutieron en la sensibilidad del anemómetro ADL 11, el hecho de comparar dos tipos de instrumentos distintos, es decir uno de modelo ADL 11 (montado en el dron) y otro de modelo FWS 20N (instalado en el mástil), la presencia de turbulencia vertical producto del giro de las hélices del dron y el error propio del instrumento durante la captura de datos. Sin embargo, las muestras de información recuperadas los días 9 de septiembre a las 13 horas y 26 de octubre a las 11 horas (Figura 2), presentan una buena similitud, casi idéntica en las mediciones.

Debido a que el monitoreo eólico se enriquece en términos de calidad de la información recolectada, con el uso de rosas de viento, en la Figura 3 se muestran algunos ejemplos de las rosas obtenidas con la integración de la rapidez y dirección del viento.

Como se aprecia en la Figura 3 con los datos del día 26 de octubre a las 11 hrs, se establece la similitud en los resultados de las mediciones, ya que en las rosas se observa una magnitud representada por el mismo color producto de los datos en ambos instrumentos, en contraste con los datos del día 9 de septiembre a las 11 hrs, donde se observa que los datos recuperados del instrumento montado en el dron, son más grandes en magnitud y en la rosa se representan en colores diferentes a los datos recuperados del instrumento instalado en el mástil. Aunque en ambas situaciones se mantiene la misma dirección. Por último, de las comparaciones más interesantes se observan las rosas producto de

los datos del día 7 de septiembre a las 14 hrs, donde se muestra que existe tanto diferencia en la magnitud como en la dirección de los datos. Esto se debió a que el instrumento instalado en el mástil, registró valor cero para la rapidez del viento al momento que el instrumento montado en el dron, sí registró información de rapidez diferente a cero para la dirección del viento recuperada por el instrumento del mástil.

En el caso de la comparación del sistema por mástil y sistema elevado por globos inflados con helio, las mediciones con el sistema elevado por globos inflados con helio, se vieron limitadas por la alta presencia de lluvia, producto de las condiciones climáticas que prevalecieron en el país durante el segundo semestre del año. De las comparaciones de medias se puede reportar una similitud estadística del 40% de los monitoreos (véase Tabla 1).

En la imagen de la Figura 2, se observan las variaciones entre ambos sistemas, mucho de esto se debe a las debilidades del sistema elevado por globos inflados con helio, ya que en los monitoreos realizados, existió influencia del viento de forma directa sobre la posición de los globos, lo que provocó durante periodos de presencia de ráfagas de viento o la existencia de fuerzas, provocadas por el empuje del viento mayores a la capacidad de sustentación del sistema, que el anemómetro descendiera de la altura de medición y de esta forma los datos recuperados por el anemómetro acoplado a los globos, muestren valores fuera del marco de referencia que es el instrumento fijo en el mástil.

Como complemento a la información descrita en las comparaciones de gráficos lineales, se tiene en la Figura 3 las rosas de viento para algunos días de monitoreo con el sistema elevado por globos. A diferencia de las representaciones de este tipo con el sistema montado en el dron, acá se contó con más datos por jornada de medición. Como se aprecia en las rosas del día 27 de octubre, los cambios en magnitud de la rapidez proyectados no difieren en gran medida. En oposición con lo representado en la rosa del día 21 de octubre donde es posible observar cambios tanto en magnitud como dirección del viento.

El análisis detallado de la comparación entre las tecnologías experimentadas, se encuentra en la Tabla 2.

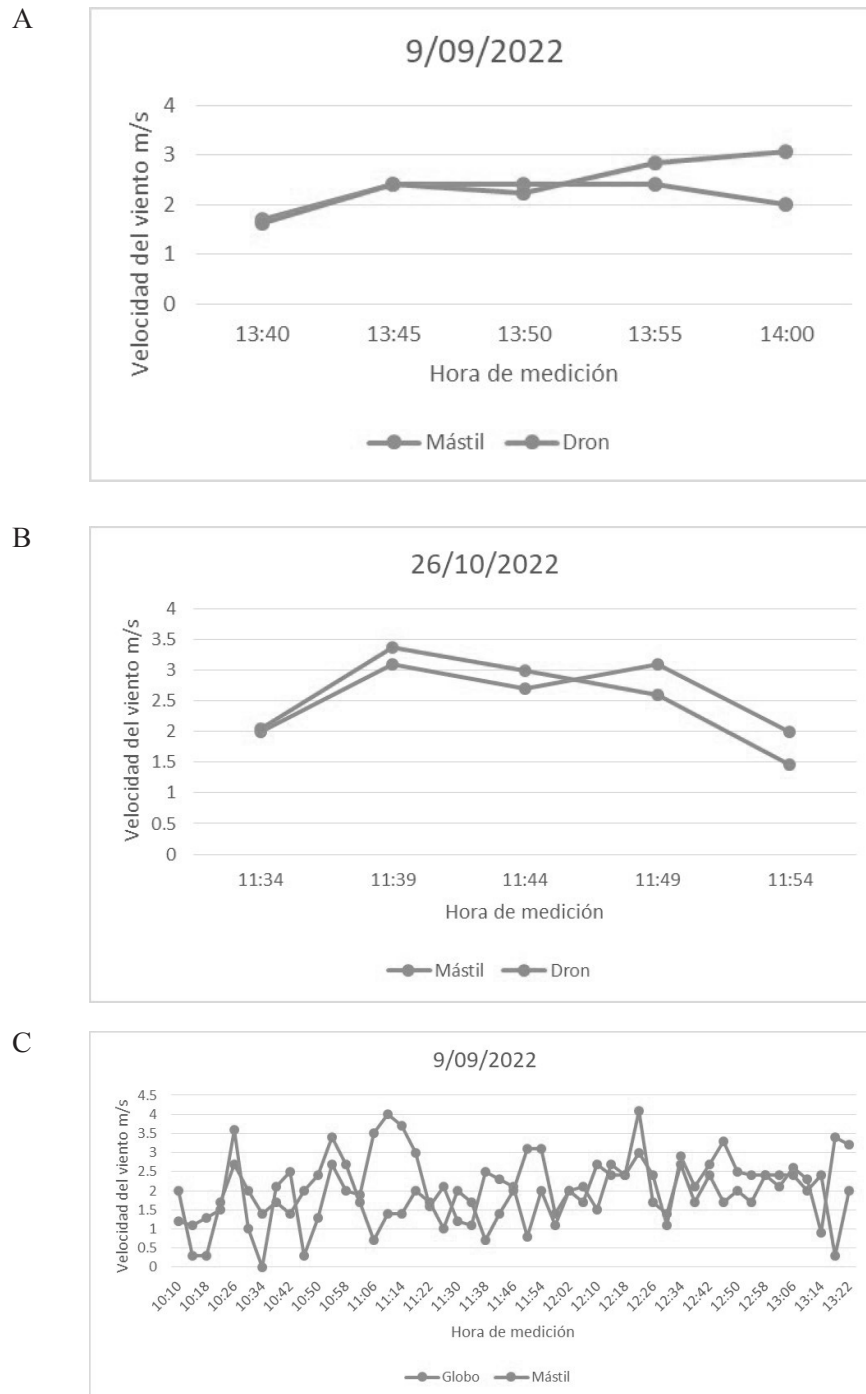
**Tabla 1**

*Resumen de las pruebas de diferencia entre medias*

Muestra	Fecha	Hora	Medias		Resultado
			Dron	Mástil	Prueba de diferencia entre medias
1	5/09/2022	14 hrs	2.2	2.946	Son estadísticamente iguales las medias.
2	7/09/2022	11 hrs	1.97	1.96	Son estadísticamente iguales las medias.
3	7/09/2022	14 hrs	9.732	0.46	No son estadísticamente iguales las medias
4	8/09/2022	11 hrs	2.526	1.9	Son estadísticamente iguales las medias.
5	8/09/2022	15 hrs	5.842	1.24	Son estadísticamente iguales las medias.
6	9/09/2022	11 hrs	4.03	2.55	Son estadísticamente iguales las medias.
7	9/09/2022	14 hrs	2.442	2.18	Son estadísticamente iguales las medias.
8	19/09/2022	11 hrs	14.36	0.66	No son estadísticamente iguales las medias
9	6/10/2022	11 hrs	6.712	2.1	No son estadísticamente iguales las medias
10	6/10/2022	14 hrs	8.334	1.04	No son estadísticamente iguales las medias
11	7/10/2022	11 hrs	1.97	1.28	Son estadísticamente iguales las medias.
12	21/10/2022	11 hrs	1.662	1.72	Son estadísticamente iguales las medias.
13	21/10/2022	14 hrs	6.656	0.14	Son estadísticamente iguales las medias.
14	26/10/2022	11 hrs	2.492	2.58	Son estadísticamente iguales las medias.
15	26/10/2022	15 hrs	7.564	0.62	Son estadísticamente iguales las medias.
16	27/10/2022	11 hrs	4.106	2.04	No son estadísticamente iguales las medias
Análisis			El 68.75% de las pruebas son estadísticamente iguales		
	Fecha	Hora	Globo	Mástil	Prueba de diferencia entre medias
1	7/09/2022	de 9 a 15 hrs	1.3726	1.0935	No son estadísticamente iguales las medias
2	9/09/2022	de 10 a 13 hrs	2.1122	1.9142	Son estadísticamente iguales las medias.
3	21/10/2022	de 13 a 16 hrs	0.6594	0.6428	Son estadísticamente iguales las medias.
4	26/10/2022	de 12 a 16 hrs	1.1113	0.8585	No son estadísticamente iguales las medias
5	27/10/2022	de 12 a 16 hrs	1.75	1.377	No son estadísticamente iguales las medias
Análisis			El 40 % de las pruebas son estadísticamente iguales		

**Figura 2**

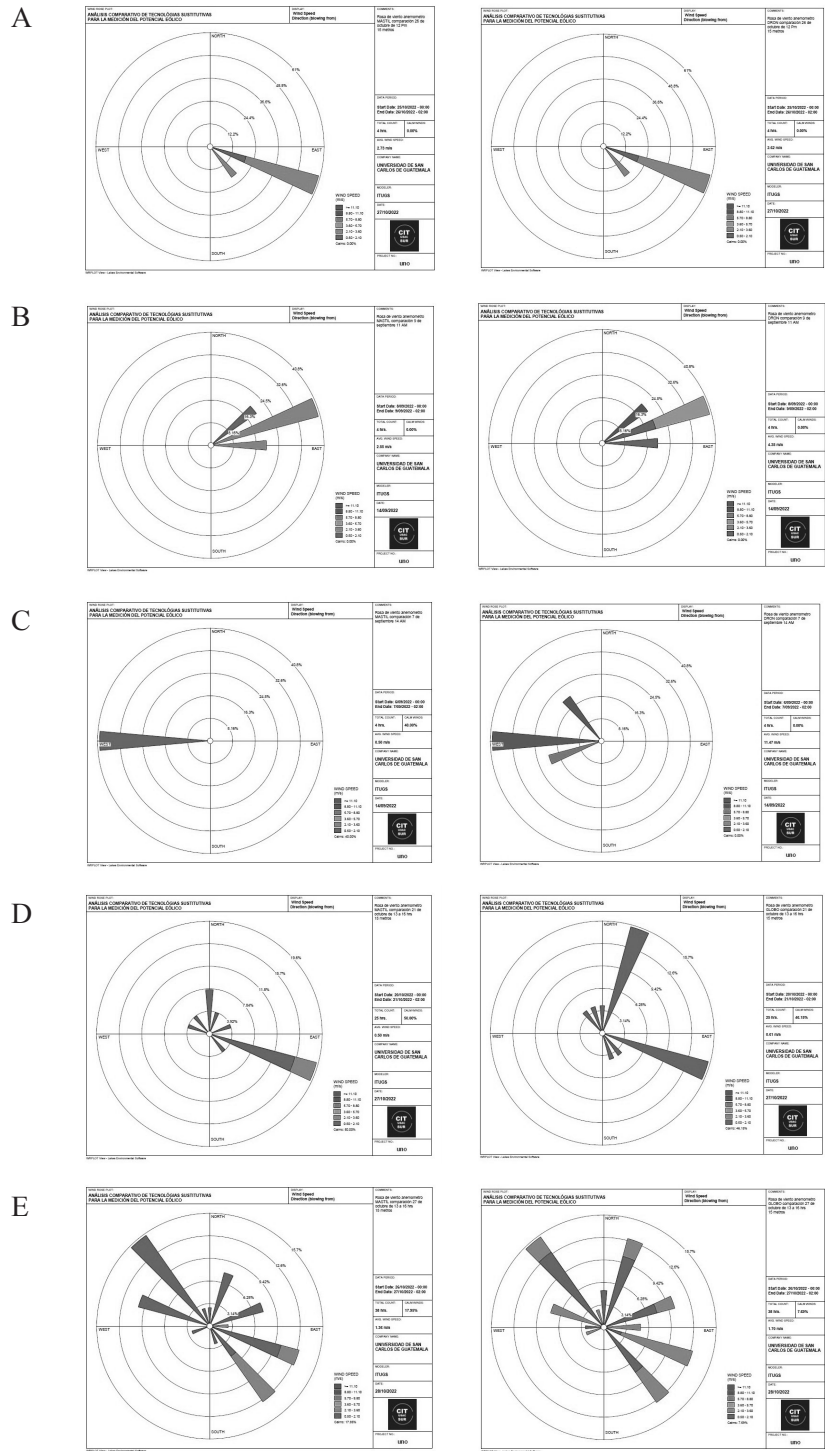
Gráficas lineales para comparación de datos



*Nota.* Panel A: datos comparación mástil-dron, Panel B: datos comparación mástil-dron, Panel C: datos comparación mástil-globo

**Figura 3**

Gráficas tipo rosa de viento para comparación de datos



*Nota.* Panel A: comparaciones sistema dron- mástil 26 de octubre de 2022. Panel B: comparaciones sistema dron- mástil 9 de septiembre de 2022. Panel C: comparaciones sistema dron- mástil 7 de septiembre de 2022. Panel D: comparaciones sistema mástil-globo 21 de octubre de 2022, Panel E: comparaciones sistema mástil-globo 27 de octubre de 2022.



**Tabla 2**  
*Análisis comparativo entre los sistemas experimentados*

Sistema de medición Comparación	Medición por mástil	Medición por elevación con globos inflados con helio	Medición por elevación con dron
Aplicación en monitoreo eólico	El sistema de monitoreo por mástil tiene la ventaja, una vez instalado, de no requerir mayor control o cuidado; la captura de los datos puede realizarse cada semana o mes de buena forma (según el modelo de anemómetro empleado en el sistema). Por esta razón se emplea como la mejor opción para el monitoreo eólico.	Este sistema puede emplearse de buena forma en sitios costeros donde la temperatura es elevada (esto reduce la probabilidad de contracción del gas helio dentro de los globos) y existen pocas limitaciones en objetos que puedan atascar la línea de anclaje.	El sistema con dron puede utilizarse sin necesidad de un sitio específico de anclaje, pero requiere de una energización continua para monitoreo eólico, esto puede solventarse en cierta medida, con el uso de más baterías o más drones para una misma jornada de medición, de esta forma se reducen los tiempos muertos.
Mediciones	Solo pueden realizarse en una altura y sitio específico. Las mediciones son confiables en valores obtenidos.	Puede moverse fácilmente, cambiar la altura y sitio de la medición. Las mediciones pueden diferir de los datos reales ya que el empuje de los globos se ve afectado por ráfagas de viento horizontal.	No son posibles mediciones continuas, debido al tiempo de vuelo útil de la batería del dron.
Cambios en el diseño planteado	Se inició el proyecto con la propuesta de tubería de acero para el mástil, sin embargo se estimó que el peso total de la estructura sería demasiado para la instalación y traslado de los materiales al sitio seleccionado de monitoreo, por lo que se decidió utilizar tubería de aluminio y de esta forma reducir el peso en casi dos tercios.	Se había proyectado elevar el anemómetro con un solo globo inflado con helio, pero debido a la posibilidad de explosión del globo y su vida útil durante una jornada de medición, se determinó que la opción más adecuada era emplear más globos de menor tamaño. Esto redujo los problemas de explosión en el aire, ya que se puede recuperar de forma más simple un globo de varios disponibles, además, los globos ensayados de látex, cumplen de buena forma una jornada completa de medición de 8 horas.	Al inicio se planteó la idea de montar el anemómetro PCE A420 sobre un dron, pero al realizar las pruebas de intento de vuelo, se logró determinar que el dron no podía elevar el anemómetro antes mencionado, por lo que se decidió cambiar el modelo de anemómetro por uno PCE ADL 11, el cual pesa dos tercios menos que el A420. Este anemómetro si logra elevarse con el uso del dron DJI Mavic 3.

**Tabla 2 (continuación)**

Sistema de medición Comparación	Medición por mástil	Medición por elevación con globos inflados con helio	Medición por elevación con dron
Aplicaciones diversas	Es limitado ya que requiere de una base para la instalación y sitios de anclaje para cables sensores.	Mediciones de la velocidad del viento con un cambio de altura rápido. Esto debido a que solo se requiere de una línea de anclaje más larga para darle mayor elevación al instrumento.	Aplicaciones de medición de velocidad del viento en sitios de difícil acceso, sobre el mar o lagos, también, muy cerca de infraestructuras.
Altura de medición	10 y 15 m, no se realizaron pruebas a mayor altura de armado, ya que requiere de un armado mayor para alcanzar más altura.	10 y 15 m, puede lograrse más siempre que el área de medición esté libre de obstáculos, para evitar que se atasque la línea de sujeción.	10 y 15 m, puede lograrse más, siempre que no se supere el alcance del control remoto del dron y se respeten las rutas aéreas.
Instalación	El mástil se puede armar con materiales no convencionales (aluminio), esto reduce el peso del traslado del mástil al sitio de instalación. De forma ordinaria se emplea acero galvanizado o estructuras armadas en acero. Se necesita de una base sólida y sitios de anclaje para cables sensores.	Se requiere de una línea anclada al suelo, un anclaje y espacio abierto para movimientos en todas direcciones.	No se requiere de alguna instalación específica, pero si requiere de un sitio libre de rutas aéreas para las mediciones de velocidad del viento.
Problemas con el entorno y el clima	La transmisión de datos se ve afectada por la alta humedad ambiental, con el equipo ensayado (anemómetro PCE FWS 20N), en algunos días de medición con mucha lluvia durante el día, no se logró recuperar datos.	Los globos inflados con helio son susceptibles a las temperaturas menores a 23 °C, ya que a baja temperatura los gases se contraen, lo que provoca una pérdida en la capacidad de elevación del anemómetro. Los efectos del empuje del viento horizontal, provoca que los globos bajen su nivel de elevación, por lo tanto, el anemómetro baja su altura de medición y algunas mediciones no son válidas durante la toma de datos.	El dron no puede emplearse con alta concentración de humedad y presencia de lluvia, debido a la naturaleza de los componentes electrónicos que lo constituyen. Ráfagas muy fuertes de viento pueden desviar la ubicación del dron, respecto al sitio de medición, de igual forma esto resta tiempo de vuelo útil durante la medición. La presencia de aves que vuelan cerca del sitio de medición, puede provocar colisiones accidentales y daños tanto para la fauna como para el dron.

Tabla 2 (continuación)

Sistema de medición Comparación	Medición por mástil	Medición por elevación con globos inflados con helio	Medición por elevación con dron
Dificultades técnicas	Perdida de datos en algunos días de medición por falta de buena conectividad entre el Logger y la computadora.	El anemómetro ensayado PCE A420, solo permite lectura de datos de forma manual, es decir se requiere leer directamente de la pantalla del instrumento, para obtener información. Este anemómetro también fue automatizado para la captura de los datos durante la jornada de medición ya que originalmente era manual para la captura de datos.	El dron ensayado (DJI Mavic 3) tiene una autonomía de vuelo de 25 min con la batería totalmente cargada, luego requiere de 80 min para recarga. No fue posible comprobar la energización desde tierra del equipo debido a que la batería del dron es “inteligente”, esto provoca que mientras se carga no puede usarse en vuelo, además, la línea de carga puede provocar que se atore en las aspas de las hélices y también provocaría lastre durante el vuelo, lo que reduciría la vida útil de los motores del dron.
Costos aproximados de los sistemas ensayados	Q 11 200.00	Q 5 800.00	Q 26 000.00

## Discusión

Debe establecerse que se observan variaciones entre las mediciones de los sistemas elevados por globo y el sistema por mástil, esto se considera que se debió a las debilidades del sistema elevado por globos inflados con helio, ya que en los monitoreos realizados existió influencia del viento de forma directa sobre la posición de los mismos, lo que provocó durante periodos de presencia de ráfagas de viento o la existencia de fuerzas, provocadas por el empuje del viento mayores a la capacidad de sustentación del sistema, que el anemómetro descendiera de la altura de medición y de esta forma los datos recuperados por el anemómetro acoplado a los globos, muestren valores fuera del marco de referencia que es el instrumento fijo en el mástil (véase la Figura 2).

En términos de diferencia y similitudes con otras investigaciones es posible mencionar que para el sistema de monitoreo con el uso de drones y comparación con instrumentos montado en mástiles han sido estudiados por Chong y colaboradores (2020), Crowe y colaboradores (2020), González-Rocha y colaboradores (2019), donde emplearon la comparación de las mediciones con un mástil a 10 metros de altura. Por su parte Simma y colaboradores (2020), realizaron comparaciones con un mástil de 3 metros de altura y Vasiljević y colaboradores (2020), desarrollaron su estudio con la comparación a 18, 31, 44, 57 y 70 metros de altura; Wetz y colaboradores (2021) compararon información con mediciones a 50 y 90 metros; y Varentsov y colaboradores (2021) realizaron la comparación a 15 metros. A partir de la información consultada se logró establecer que, a pesar que en el presente estudio se realizaron mediciones a 10 metros, las cuales podrían compararse con otros estudios a la misma altura, existen diferencias. Lo primero es que en las investigaciones previas, no existen desarrollos experimentales en la misma ubicación geográfica, Chong y colaboradores (2020) en Corea del Sur y Crowe y colaboradores (2020) en Estados Unidos; en el mismo año y con la misma duración de monitoreo. Esto es relevante, ya que según lo expuesto por González-Rocha y colaboradores (2019) “la variabilidad de los datos obtenidos del viento depende también de la ubicación geográfica y las condiciones del terreno” (p. 2); lo segundo es que los investigadores que compararon los datos recuperados con el montaje de instrumentos sobre drones, no emplearon el mismo modelo de dron o anemómetro, además que las tecnologías de los instrumentos fueron diferentes.

En el caso de los estudios que emplearon instrumentos acoplados o montados en la aeronave es posible mencionar que Zheng-nong y colaboradores (2021), Sasaki y colaboradores (2021), Wearmouth (2022), Ingenhorst y colaboradores (2021), Wolf y colaboradores (2017), Chong y colaboradores (2020), que utilizaron anemómetros sónicos; Hattenberger y colaboradores (2022) y Rudiyanto y colaboradores (2020), emplearon un anemómetro de hilo caliente, Vasiljević y colaboradores (2020) realizaron su experimentación con el uso de radares LiDAR. Por lo que, a pesar que deberían ser mediciones similares, las tecnologías empleadas en los instrumentos influyen de forma directa en las mediciones, y debido a que en el presente estudio se buscó que las mediciones de la rapidez del viento fueran lo más cercanas posibles a las solicitudes reales de estos estudios, se requirió el empleo de un anemómetro de cazoletas. El único registró que se ubicó sobre el uso de anemómetros de cazoletas montados en aeronaves, fue por parte de Riddell (2014), sin embargo, en su estudio empleo un helicóptero a control remoto para las mediciones y no un dron como tal.

Según Prudden y colaboradores (2018), la instalación de anemómetros de cazoletas es dificultosa en aeronaves no tripuladas, debido a la interferencia de los efectos dinámicos de sus piezas móviles. A pesar de esto, los resultados de la investigación demuestran la factibilidad de instalar un anemómetro de cazoletas lo suficientemente liviano (PCE ADL 11) en un dron comercial (DJI Mavic 3) y también la posibilidad de obtener datos de rapidez del viento aceptables.

Otro factor de relevancia es el tiempo de vuelo para cada muestreo. Como menciona Avanzini y colaboradores (2016), las aeronaves de este tipo, pueden llegar a volar con mayor tiempo si se logran avances en el almacenamiento de energía. Prudden y colaboradores (2018) realizaron mediciones con una duración de entre 12 y 15 min, Ingenhorst y colaboradores (2021) con 25 min, Meier y colaboradores (2022) con 3 min, Crowe y colaboradores (2020) con 13 min, Zimmerman (2022) 10 min, Wetz y colaboradores (2021) 17 min y Chong y colaboradores (2020) 20 min. Con base en estos resultados, se puede afirmar que el tiempo de vuelo de los drones para monitoreo del viento es limitado a un promedio de 15 min, de forma independiente del modelo de aeronave y tecnología empleada. Al respecto también Mulgaonkar y colaboradores (2014) describe que los tiempos promedio de vuelo efectivo de este tipo de tecnologías, es de 15 a 20 min y los resultados del presente estudio alcanzaron los 25 min de vuelo

efectivo, por lo que el tiempo logrado con el uso del dron DJI Mavic 3 es aceptable.

En el caso del manejo de los resultados y su representación, autores como Varentsov y colaboradores (2021), Wolf y colaboradores (2017), Simma y colaboradores (2020), Vasiljević y colaboradores (2020), Hattenberger y colaboradores (2022), Ingenhorst y colaboradores (2021), Meier y colaboradores (2022), Rudiyanto y colaboradores (2020), Zimmerman (2022) emplearon gráficas lineales para comparar los datos de las mediciones obtenidas con el uso de drones y los datos de mástiles fijos. La diferencia con la forma en que se representaron los datos en este estudio fue la frecuencia de los mismos, ya que la mayoría de estudios consultados manejaron frecuencias de segundos, mientras que en la presente investigación se utilizó una frecuencia de 5 min para el caso de las comparaciones con el sistema montado con el dron y 4 min para la comparación con el sistema elevado por medio de globos inflados con helio. Las investigaciones más cercanas fueron la de Crowe y colaboradores (2020), que manejó una frecuencia de 2 y 5 min en sus gráficas, además, el estudio de Wetz y colaboradores (2021), con una frecuencia de un minuto. González-Rocha y colaboradores (2019) empleo tanto gráficas lineales como Rosas de viento para la comparación de los resultados, aunque el autor no menciona el tipo de software para el tratamiento de los datos. Con base en lo expuesto, se estableció que el manejo de los datos en la presente investigación, fue adecuado en la forma de comparar los resultados en los diversos sistemas.

Por último en la comparación de los sistemas de medición del viento elevados por medio de globos, a pesar que González-Rocha y colaboradores (2019), Wolf y colaboradores (2017), Sasaki y colaboradores (2021) y Riddell (2014), mencionan que el sistema de monitoreo con el empleo de globos es convencional y caro, solo se reportan dos estudios que desarrollaron el tipo de comparación que se ha alcanzado en la investigación que se presenta.

Varentsov y colaboradores (2021), generaron un estudio con el uso de un globo meteorológico para la elevación de instrumentos de medición de las condiciones del viento, sin embargo, no lo anclaron al suelo, lo dejaron ir como un globo ordinario de meteorología y se rastrearon los resultados por medio de GPS.

Lyasota (2013), por su parte desarrolló un prototipo de monitoreo eólico con el uso de un anemómetro ultrasónico instalado en la línea de anclaje de un globo cautivo al suelo, el cual fue elevado a 150 y 23 m.

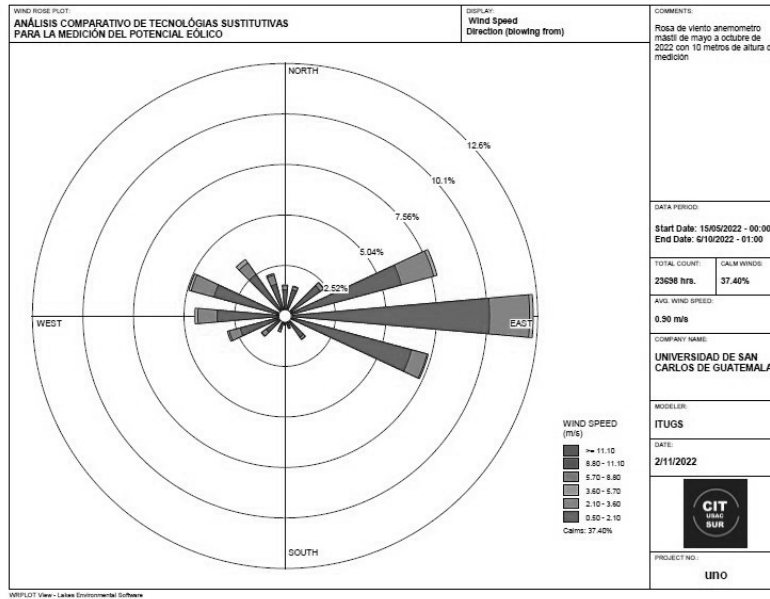
Con esto, comparó los datos recuperados de un anemómetro de cazoletas instalado en una turbina eólica cercana y el anemómetro instalado en la línea del globo cautivo. Las diferencias de las medias de las velocidades del viento reportadas, para dos jornadas de monitoreo fueron de 3,5 m/s y 2,5 m/s, en el caso del tiempo de muestreo fue de minutos por cada jornada.

Al comparar los resultados con las medias de cinco jornadas obtenidas en el presente estudio, se obtuvieron diferencias de 0.28, 0.20, 0.01, 0.26 y 0.38 m/s, con la consideración que las pruebas se realizaron a alturas de 10 y 15 m, con jornadas de medición de 3 a 6 horas y una frecuencia de muestreo de 4 min. Se puede establecer que influye de forma directa el uso de instrumentos similares y jornadas de tiempo más amplias, con la finalidad de obtener más datos representativos.

Debido a que el potencial eólico requiere de un tiempo prolongado para ser un dato aceptado en un sitio en particular, se consideran los resultados de las mediciones con el uso del anemómetro instalado en el mástil y se descartan los datos obtenidos con los otros sistemas ensayados, ya que carecen de una continuidad en la medición. En la Figura 4 se observa la rosa de viento producto del monitoreo de seis meses (mayo a octubre de 2022) a una altura de 10 m. Con una velocidad promedio resultante de 0.90 m/s y densidad del aire de 1.29 kg/m<sup>3</sup>, se obtuvo una potencia calculada para el viento de 0.94041 W/m<sup>2</sup>.

Para finalizar se puede concluir con lo siguiente, el sistema de monitoreo por mástil se ratifica como el sistema más recomendable para los fines de medición del potencial eólico en un sitio en particular, esto se debe a la confiabilidad de la información recolectada y la capacidad del sistema de continuar con las mediciones en tiempos adecuados, el sistema de monitoreo por globos elevados con helio, tiene el potencial para ser explorado con mayor detenimiento e interés, ya que las ventajas muestran posibles aplicaciones para la medición de la rapidez del viento de forma rápida y simple, durante una jornada aceptable, siempre que las condiciones climáticas y del sitio a monitorear lo permitan, el sistema de monitoreo con el uso del dron, es el más estudiado como solución opcional para la medición de la rapidez del viento, pero carece de la continuidad en su energización y aplicación específica, por lo que el desarrollo de este tipo de aeronaves para medición de la rapidez del viento y el rendimiento en vuelo de la misma, deben continuar como interés en futuras investigaciones.

**Figura 4**  
Rosa de viento producto de las mediciones en el mástil



*Nota.* Mediciones realizadas del mes de mayo al mes de octubre de 2022, a una altura de 10 metros, en el sitio seleccionado de las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur.

### Agradecimientos

A las autoridades del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS, por facilitar el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Erick Fino, por su apoyo para la automatización del anemómetro PCE A420 en el área de Electrónica del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.42.0.81 con código AP9CU-2022 en el Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas.

### Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: SA-L

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: SA-L

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: SA-L

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: SA-L

Participación en análisis de datos, estructura y en la escritura del documento: SA-L

### Materiales suplementarios

Los materiales suplementarios de este artículo se encuentran en la página web de la revista a través de doi: <https://doi.org/10.36829/63CTS.v11i1.1560>

### Referencias

Avanzini, G., de Angelis, E.L., Giulietti, F. (2016). Optimal performance and sizing of a battery-powered aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 59, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.10.015>

- Asea Brown Boveri & ABB, S. (2012). *Cuaderno de aplicaciones técnicas no. 12 Plantas eólicas*.
- Chong, J., Lee, S., Shin, S., Hwang, S. E., Lee, Y., & Kim, S. (2020). Research on meteorological technology development using rotary multicopter unmanned aerial vehicles and its application. En *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 540-544. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214037>
- Crowe, D., Pamula, R., Cheung, H. Y., & De Wekker, S. F. (2020). Two supervised machine learning approaches for wind velocity estimation using multi-rotor copter attitude measurements. *Sensors*, 20(19), Artículo 5638. <https://doi.org/10.3390/s20195638>
- Giebel, G., Schmidt Paulsen, U., Bange, J., la Cour-Harbo, A., Reuder, J., Mayer, S., van der Kroonenberg, A., & Mølgaard, J. (2012). Autonomous Aerial Sensors for Wind Power Meteorology - A Pre-Project. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R [http://vbn.aau.dk/files/60873544/PSOAerialSensors\\_FinalReport.pdf](http://vbn.aau.dk/files/60873544/PSOAerialSensors_FinalReport.pdf)
- Google Earth (s.f.) Ubicación Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur. Recuperado el 16 de agosto de 2023. <https://earth.google.com/web/@14.37337632,-90.72128957,988.59138873a,29.90782664d,35y,-68.77752262h,69.98747482t,0r/data=CgRCAggB>
- González-Rocha, J., Woolsey, C. A., Sultan, C., & De Wekker, S. F. J. (2019). Sensing wind from quadrotor motion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 42(4), 836-852. <https://doi.org/10.2514/1.G003542>
- Thé, J. van G., Johnson, M., Shatalov O., & Smotrikov, V. (2018). *WRPLOT View* (version 8.0.2.) [Software]. Lakes environmental software. <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>
- Hattenberger, G., Bronz, M., & Condomines, J. P. (2022). Estimating wind using a quadrotor. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 14, <https://doi.org/10.1177/175682932111070824>
- Ingenhorst, C., Jacobs, G., Stöbel, L., Schelenz, R., & Juretzki, B. (2021). Method for airborne measurement of the spatial wind speed distribution above complex terrain. *Wind Energy Science*, 6(2), 427-440. <https://doi.org/10.5194/wes-6-427-2021>
- López, M. V. (2012). *Ingeniería de la energía eólica* (Vol. 5). Marcombo.
- Lyasota, A. (2013). *Sistema de medición de las características del viento en altura a base de globo cautivo* [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2099.1/17353>
- Meier, K., Hann, R., Skaloud, J., & Garreau, A. (2022). Wind Estimation with Multirotor UAVs. *Atmosphere*, 13(4), 551. <https://doi.org/10.3390/atmos13040551>
- Moro Vallina, M. (2013). *Tecnología industrial I*. Ediciones Paraninfo.
- Mulgaonkar, Y., Whitzer, M., Morgan, B., Kroninger, C. M., Harrington, A. M., & Kumar, V. (2014, June). Power and weight considerations in small, agile quadrotors. In *Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VI* (Vol. 9083, pp. 376-391). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <https://doi.org/10.1117/12.2051112>
- Prudden, S., Fisher, A., Marino, M., Mohamed, A., Watkins, S., & Wild, G. (2018). Measuring wind with small unmanned aircraft systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 176, 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.029>
- Rudiyanto, B., Hariono, B., & Budiprasojo, A. (2020). Quadcopter Surveyor Drone Wind Velocity Data Characteristic for Optimal Hotwire Sensor Position. *Proceedings of Journal of Physics: Conference Series*, 1569(3), Artículo 032096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032096>.
- Riddell, K. D. A. (2014). *Design, testing and demonstration of a small unmanned aircraft system (SUAS) and payload for measuring wind speed and particulate matter in the atmospheric boundary layer* (Publication Number: AAT 1569498) [Tesis de maestría, University of Lethbridge]. <https://opus.uleth.ca/server/api/core/bitstreams/f225ae93-0323-4e33-a06a-d74b2a5a43f0/content>

- Sasaki, K., Inoue, M., Shimura, T., & Iguchi, M. (2021). In Situ, Rotor-Based Drone measurement of wind vector and aerosol concentration in volcanic areas. *Atmosphere*, 12(3), 376. <https://doi.org/10.3390/atmos12030376>.
- Simma, M., Mjøen, H., & Boström, T. (2020). Measuring wind speed using the internal stabilization system of a quadrotor drone. *Drones*, 4(2), Artículo 23. <https://doi.org/10.3390/drones4020023>.
- Varentsov, M., Stepanenko, V., Repina, I., Artamonov, A., Bogomolov, V., Kuksova, N., Marchuk, E., Pashkin, A., & Varentsov, A. (2021). Balloons and quadcopters: Intercomparison of two low-cost wind profiling methods. *Atmosphere*, 12(3), Artículo 380. <http://doi.org/10.3390/atmos12030380>
- Vasiljević, N., Harris, M., Tegtmeier Pedersen, A., Rolighed Thorsen, G., Pitter, M., Harris, J., Bajpai, K., & Courtney, M. (2020). Wind sensing with drone-mounted wind lidars: proof of concept. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(2), 521-536, <https://doi.org/10.5194/amt-13-521-2020>
- Vega de Kuper, J. C., & Ramírez Morales, S. (2014). *Fuentes de energía: Renovables y no renovables aplicaciones*. Alpha Editorial.
- Wearmouth, C. (2022). *Flying anemometers: Performance assessment of a miniaturized sonic anemometer for measuring wind from a drone* [Tesis de maestría, University of Calgary]. <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/39576>
- Weather Spark (s.f.) Clima y tiempo promedio durante todo el año en Palín. Recuperado el 16 de agosto de 2023. <https://weatherspark.com/y/11666/Average-Weather-in-Pal%C3%ADn-Guatemala-Year-Round>.
- Wetz, T., Wildmann, N., & Beyrich, F. (2021). Distributed wind measurements with multiple quadrotor unmanned aerial vehicles in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(5), 3795-3814. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3795-2021>.
- Wolf, C. A., Hardis, R. P., Woodrum, S. D., Galan, R. S., Wichelt, H. S., Metzger, M. C., Bezzo, N., Lewin, G., & de Wekker, S. F. (2017). Wind data collection techniques on a multi-rotor platform. En *Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (pp. 32-37). <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2017.7937739>
- Zheng-nong, L. I., Hao, F. E. N. G., Ou, P. U., & Yijun, S. H. E. N. (2021). Boundary layer wind profile measurement based on a six-rotor UAV anemometer. *Engineering Mechanics*, 38(8), 121-132. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0553>
- Zimmerman, S. (2022). *Development of a disturbance observer for wind estimation by multirotor drone using machine learning* [Tesis de maestría, University of British Columbia]. <https://doi.org/10.14288/1.0413698>