



Arable Mark 2

Mediciones

Principales

Una comparación de precisión

Diciembre 2020

arable.com



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Introducción.....	3
Método.....	4
Resultados.....	7
Precipitación.....	8
Temperaturadelaire.....	11
Humedadrelativa/Déficitdepresióndevapor.....	12
Conclusión.....	14
Agradecimientos.....	15

INTRODUCCIÓN

Arable es una empresa de datos y análisis que permite tomar mejores decisiones en la agricultura mediante un enfoque integrado de hardware, software y ciencia de datos. En el centro de la solución de Arable se encuentra el Arable Mark 2, una estación meteorológica y un monitor de cultivos, todo en uno, que recoge datos sobre el clima y las plantas para obtener información procesable bajo cualquier condición de cultivo. El dispositivo cuenta con un diseño resistente para una mayor durabilidad sobre el terreno, conectividad celular global y un robusto conjunto de sensores que miden más de 40 flujos de datos sobre plantas y clima. Incluye un disdrómetro acústico para medir las precipitaciones, así como radiómetros de onda corta ascendente y descendente, radiómetros de onda larga, espectrómetros de 6 bandas y GPS.

El diseño y los componentes del hardware del Mark 2 fueron elegidos teniendo en cuenta la precisión y la durabilidad en el campo, pero también entendiendo que las mediciones centrales, así como cualquier característica agronómica derivada, se mejorarían aplicando soluciones de aprendizaje automático (Machine Learning - ML). El aprendizaje automático se enmarca dentro del campo de la ciencia de datos y se refiere, en términos generales, al estudio de algoritmos informáticos que construyen modelos matemáticos basados en datos de muestra, conocidos como “datos de entrenamiento”, para hacer predicciones o tomar decisiones [1]. En particular, el uso de ML por parte de Arable se centra en la calibración de las mediciones principales para mejorar la precisión, así como en el

aprovechamiento del análisis predictivo para las características agronómicas relevantes.

Este documento detalla cómo nuestras soluciones ML mejoran las mediciones principales y cómo validamos su desempeño en el campo. Este proceso de validación implica la ubicación conjunta de dispositivos Mark 2 con instrumentos de referencia estándar de oro y grado de investigación en sitios de AmeriFlux [2] o similares en América del Norte, Europa y Australia. Estas implementaciones en el mismo lugar nos permiten comparar las mediciones del Mark 2 con la realidad sobre el terreno localizado para establecer métricas de precisión reales dentro de los campos en una variedad de zonas climáticas. También instalamos, junto a dos estaciones meteorológicas comerciales, Davis Vantage Pro2 [3] y METER ATMOS 41 [4], para determinar cómo se compara el Mark 2 con dispositivos similares en el mercado.

En la sección Método, describimos nuestro proceso para entrenar los modelos ML y probar su rendimiento utilizando tanto los instrumentos de referencia como los dispositivos de calidad comercial. En la sección Resultados, mostramos conjuntos de gráficas comparativas y métricas de desempeño para cada una de las mediciones principales y proporcionamos una interpretación de esos resultados. En la sección Conclusión, resumimos los resultados y discutimos cómo el Mark 2 y el sistema Arable en general mejorarán con el tiempo utilizando nuestras soluciones ML.

MÉTODO

Los modelos ML de Arable requieren datos de entrenamiento para construirlos, así como datos de prueba para validar su rendimiento. Siendo Así, Arable ha invertido mucho en la recopilación de grandes cantidades de estos datos de referencia: hasta la fecha, Arable ha recopilado más de 70 millones de puntos de datos a través de 45 mediciones en 35 sitios diferentes. Estos sitios de investigación controlados conforman colectivamente nuestra red de calibración/validación, conocida como la “red Cal/Val” de Arable.

A través de la red Cal/Val, Arable aprovecha los conjuntos de datos in situ de alta resolución y con grado de investigación para las calibraciones y análisis de los sensores Mark 2. Esta iniciativa comenzó a finales de 2018 con la recopilación de

datos de temperatura del aire y lluvia y, en 2019, se expandió para incluir mediciones en todo el conjunto de sensores. La red cubre actualmente 11 zonas climáticas Köppen-Geiger [5] como se muestra en la Figura 1 a continuación. Las ubicaciones se seleccionaron en función de la calidad de los datos, la máxima difusión geoespacial y la capacidad de trabajar con Arable. Esta red de flujos de datos de alta calidad no sólo permite actualizar periódicamente la calibración del sistema Mark 2, sino que también nos permite diseñar el hardware de los sensores con plazos de desarrollo más cortos, probar nuevas funciones y poner en marcha nuevos análisis con la integración de sensores de terceros.

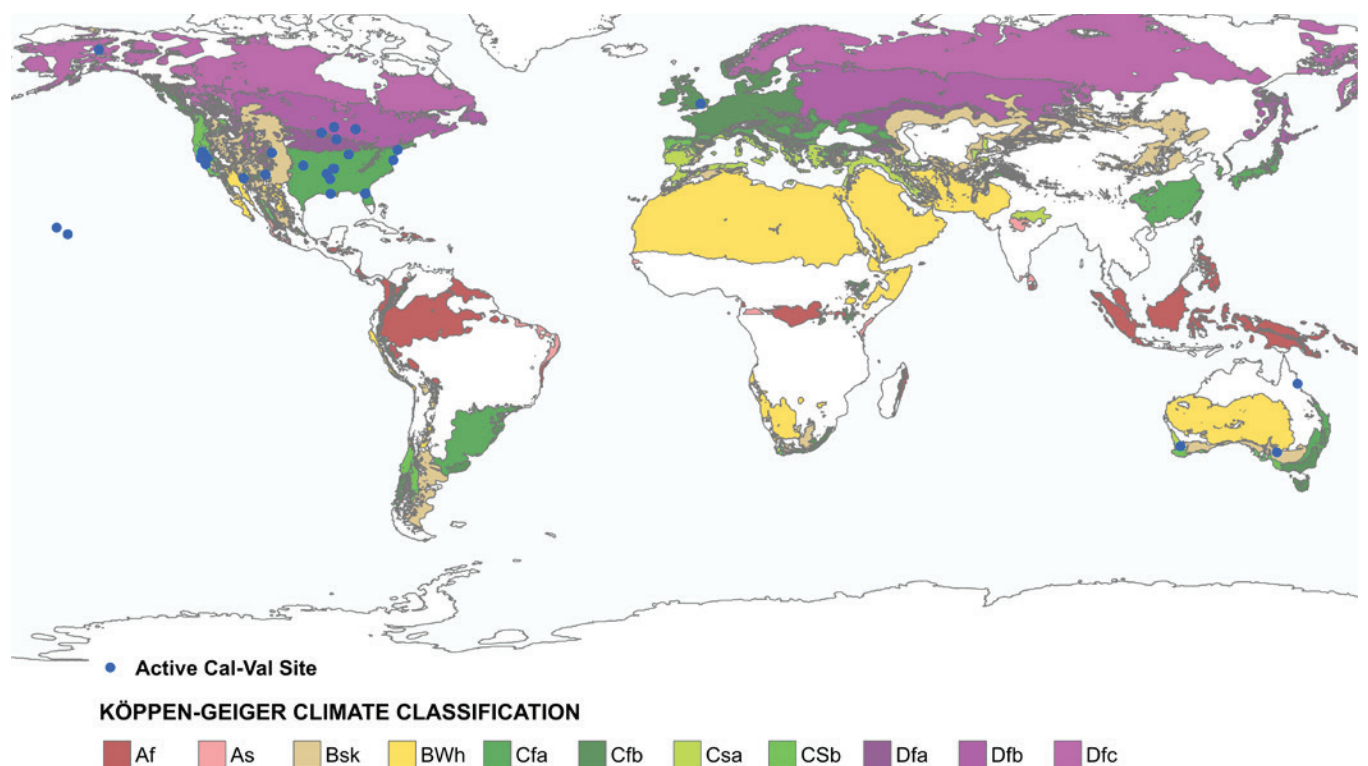


Figura 1. Mapa de la red Cal/Val de Arable. Los puntos azules indican la ubicación de sitios específicos, con las zonas climáticas de Köppen-Geiger diferenciadas por colores.

La red Cal/Val está asociada a una amplia gama de instituciones que nos proporcionan datos muestreados utilizando instrumentos de gran exactitud y precisión. El Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA [6] es un centro de investigación y desarrollo de clase mundial en la ciencia de la precipitación. Este es uno de los cuatro sitios en los que el Mark 2 está ubicado junto con un disdrómetro láser, lo que permite acceder a los datos de precipitación del radar y del disdrómetro para la calibración de las precipitaciones. El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (LNER) [7] es otro centro de investigación de categoría mundial conocido por la espectrorradiometría. Hemos trabajado con el LNER desde 2017, validando nuestras mediciones de onda corta, onda larga y dirección de la luz incidente. Un gran porcentaje de nuestros socios son miembros de la Red AmeriFlux [2], que está equipada con sensores de referencia estándar de oro para la investigación climática y ecológica. Arable también colabora con investigadores que gestionan torres meteorológicas de universidades y otras redes meteorológicas, como el Arboreto Lyon de la Universidad de Hawái, Field and Fork de la Universidad de Florida, la Universidad de Rutgers y el departamento de Ciencias Atmosféricas y Oceánicas de la Universidad de Wisconsin. La red abarca cuatro niveles de datos especializados:

- (1) **Precipitaciones.** Distribuciones de tamaño y velocidad de las gotas y precipitaciones totales medidas con disdrómetros láser.
- (2) **Metereología.** Temperatura, humedad, presión, lluvia y viento con calidad científica.

- (3) **Espectrorradiometría.** Radiación de banda ancha de onda corta y onda larga, así como espectrometría ambiental de alta resolución, proveniente de sensores de referencia estándar de oro.
- (4) **Mediciones de Eddy covariance (covariancia de remolino).** Intercambio en todo el ecosistema de vapor de agua (evapotranspiración), dióxido de carbono (fotosíntesis y respiración) y radiación (energía de onda corta y onda larga) junto con los factores meteorológicos.

Usamos los datos recopilados en estos sitios Cal/Val para alinear las mediciones del Mark 2 con las mediciones de referencia estándar de oro a lo largo del tiempo. Esto nos proporciona flujos de datos continuos a través de múltiples mediciones, lo que nos permite identificar cualquier discrepancia entre las grabaciones del Mark 2 sin procesar y la realidad en situ. Estos datos se utilizan para entrenar modelos ML que “aprenden” las mediciones corregidas o calibradas provenientes de los instrumentos de referencia estándar de oro. A continuación, los modelos ML se aplican a los datos entrantes en tiempo real para obtener una base de mediciones principales más precisa y confiable.

Este proceso es iterativo en el sentido de que estos modelos se actualizan periódicamente a medida que recopilamos más datos. A medida que los modelos mejoran con más datos de entrenamiento, son capaces de discernir patrones más complejos y, a su vez, producen predicciones

que son mejores y más precisas. Este es el verdadero poder de ML: podemos seguir mejorando los resultados agregando datos a los modelos y lanzando nuevo software sin tener que actualizar el hardware.

Para garantizar el más alto nivel de precisión, no solo utilizamos nuestra red Cal/Val para construir los modelos, sino que también probamos y confirmamos exhaustivamente su rendimiento continuo. Este documento ofrece una visión del mundo de este proceso de validación, centrándose en la comparación del Mark 2 con otros dispositivos de estaciones meteorológicas comerciales, utilizando los dispositivos de referencia como base de rendimiento.

Para los resultados que se exponen en este documento, utilizamos datos de dos sitios de Cal/Val, que se nombran por su ubicación: Hilo (en Hawái, EE. UU.) y Santa Rosa (en California, EE. UU.). En ambos sitios, utilizamos un OTT Parsivel² [8] como estándar de referencia para la precipitación. Este es un disdrómetro láser de alta calidad que cuenta las gotas de agua y las clasifica según su diámetro y velocidad, obteniendo así una tasa y cantidad de precipitación precisas. En el sitio de Santa Rosa, utilizamos adicionalmente un Vaisala HUMICAP[®] HMP155 [9] con un MeteoShield (escudo de radiación helicoidal de aspiración natural) [10] como referencia para la temperatura del aire y la humedad relativa, junto con un radiómetro neto Kipp & Zonen CNR4 [11] como referencia para la radiación solar. Se trata de instrumentos de grado de investigación que proporcionan insumos meteorológicos para estudios en las mejores instalaciones de investigación de todo el mundo.

Además, elegimos ubicar dos estaciones meteorológicas comerciales, Davis Vantage Pro2 [3] y METER ATMOS 41 [4], en cada uno de estos lugares. El Vantage Pro2 es una estación meteorológica convencional que proporciona algunas características relevantes desde el punto de vista agronómico, como la evapotranspiración. El ATMOS 41 es una estación meteorológica de precio similar que es una de las varias ofertas de METER en su línea de soluciones medioambientales. En ambos sitios, los dispositivos se colocan a una distancia de 1-2 metros entre sí, a una altura de dos metros sobre el nivel del suelo. Se limpian regularmente y se mantienen según las especificaciones del fabricante. En la siguiente sección, ofrecemos un análisis en profundidad del rendimiento de estos dispositivos en una variedad de mediciones.

RESULTADOS

Esta sección compara el Arable Mark 2 con el Davis Vantage Pro2 y el METER ATMOS 41 en las siguientes mediciones:

Precipitación

Temperatura del aire

Humedad relativa/déficit de presión de vapor, como sustituto de la humedad relativa ya que el ATMOS 41 no proporciona la humedad relativa directamente.

Se utilizan tres métricas para evaluar el rendimiento:

MAE: Error absoluto medio

RMSE: Error cuadrático medio

MBE: Error de sesgo medio

Todos los resultados se calcularon en una escala de tiempo horaria, teniendo en cuenta que en el caso de las precipitaciones también se calcula un error porcentual acumulado para demostrar cómo los errores se acumulan con el tiempo.

PRECIPITACIÓN

En las Figuras 2 y 3 a continuación, mostramos las cantidades de precipitación para el Mark 2, el Davis Vantage Pro2 y el METER ATMOS 41 (eje y) frente a la referencia estándar OTT Parsivel² (eje x). Cada punto corresponde a un valor horario y la línea de identidad negra muestra dónde las cantidades de precipitación serían iguales (sin error o discrepancia respecto a la referencia estándar). Los puntos que

caen por encima o por debajo de esa línea corresponden a casos de sobreestimación y subestimación de las precipitaciones, respectivamente, observando que cuanto más se aleja el punto de la línea, mayor es el error. Por el contrario, una dispersión estrecha centrada en la línea representa errores mínimos y una coincidencia cercana a la referencia estándar.

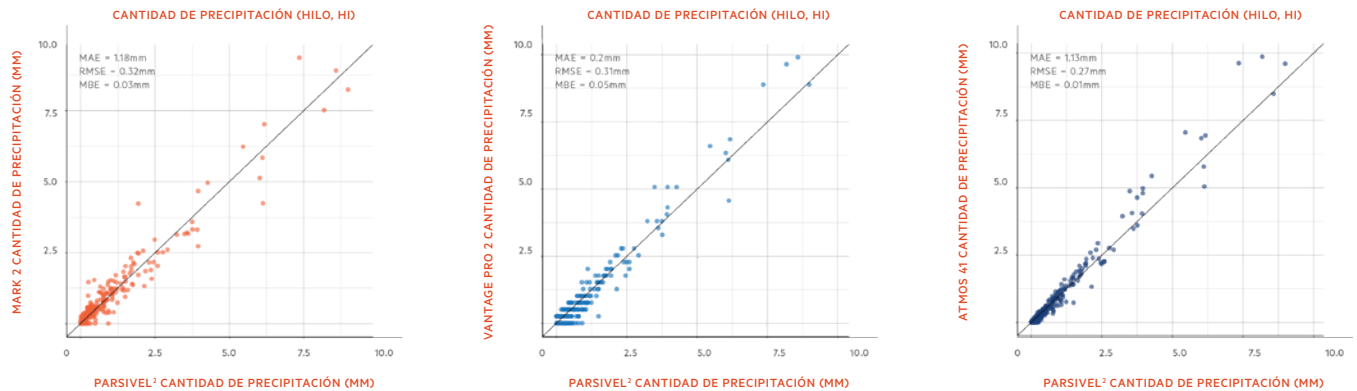


Figura 2. Comparación de precipitación en el sitio Hilo utilizando datos de agosto a octubre de 2020.

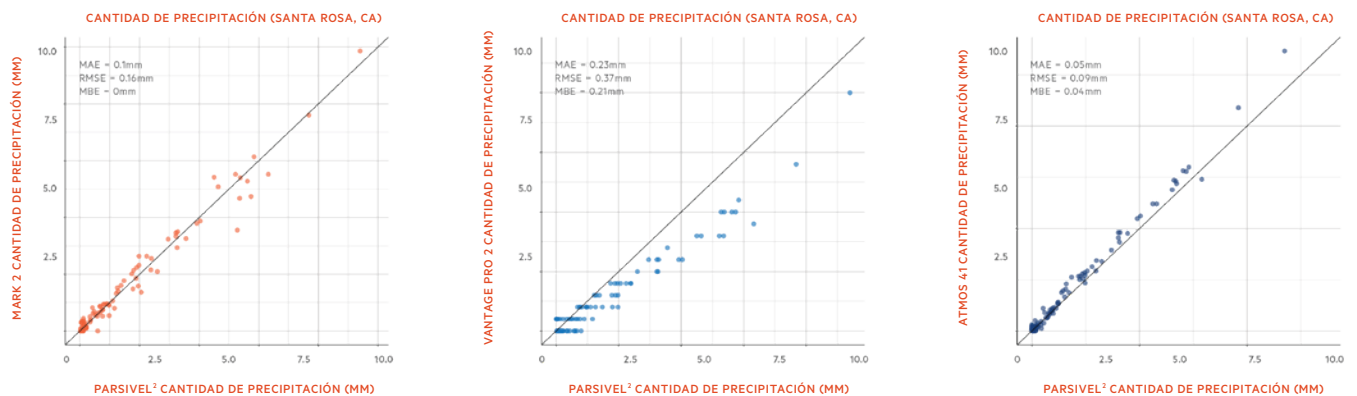


Figura 3. Comparación de la precipitación en el sitio de Santa Rosa utilizando datos de abril a junio de 2020.

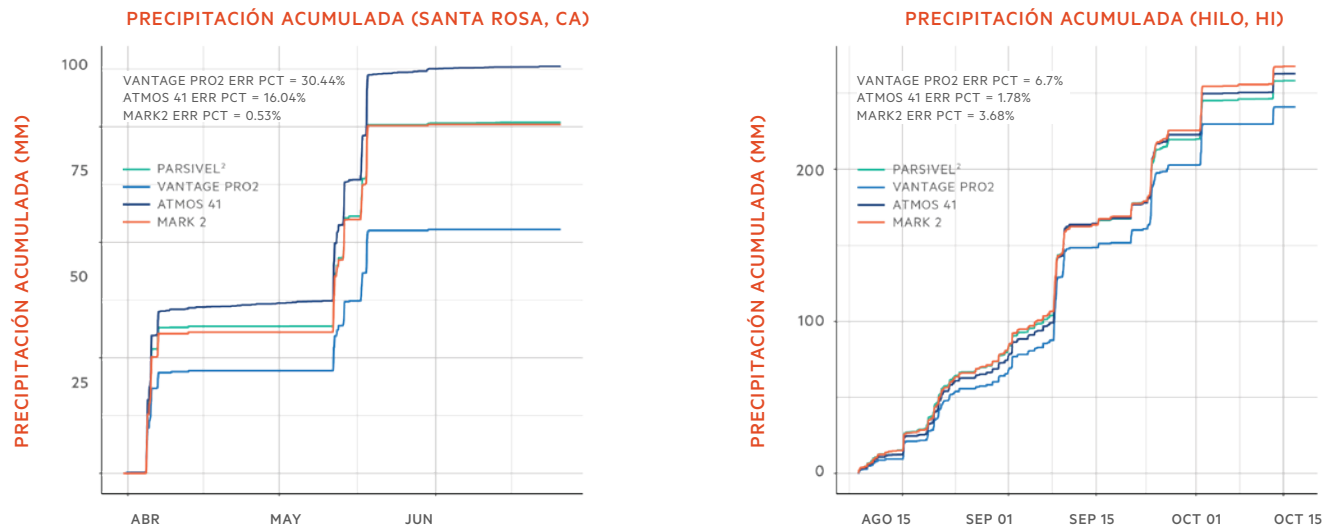


Figura 4. Comparación de la precipitación acumulada utilizando los mismos datos que en las Figuras 2 y 3.

Como se ve en la Figura 3, el ATMOS 41 tiene los errores horarios más bajos en todas las métricas con excepción del MBE en el sitio de Santa Rosa, donde el Mark 2 tiene un sesgo cero en promedio. El Vantage Pro2 subestima sistemáticamente, lo que es más evidente en el sitio de Santa Rosa, donde los puntos de datos están claramente descentrados produciendo un MBE de -0,21 mm. En este contexto, la MBE puede considerarse la métrica más importante, ya que suele ser interesante comprender cómo se agravan los errores con el tiempo. Por esta razón, también trazamos la precipitación acumulada para los periodos de tiempo estudiados, como se muestra en la Figura 4 anterior.

Los resultados de la Figura 4 son coherentes con los de la Figura 3 en tanto que los errores porcentuales globales coinciden con lo que cabría esperar teniendo en cuenta sus MBE correspondientes. En el sitio de Santa Rosa, las MBE se clasifican de mejor a peor de la siguiente manera: Mark 2 (0 mm), ATMOS 41 (0,04 mm) y Vantage Pro2 (-0,21 mm);

mientras tanto, los errores porcentuales siguen la misma clasificación: Mark 2 (0,53%), ATMOS 41 (16,04%) y Vantage Pro2 (30,44%). Los resultados de Hilo se pueden desglosar de manera similar con el Mark 2 y el ATMOS 41 intercambiando el primer y segundo lugar. En ambos sitios, el Vantage Pro2 no parece ser tan preciso debido a su tendencia a subestimar

Esto ejemplifica algunos de los problemas comunes que surgen al medir la precipitación con instrumentación tradicional. El Vantage Pro2 registra la precipitación utilizando un balde basculante convencional, que es uno de los métodos más comunes que se utilizan en la actualidad. Sin embargo, a pesar de su uso generalizado, este método, y los pluviómetros en general, está sujeto a muchas fuentes de error, y arroja cantidades inferiores a la precipitación real que llega al suelo hasta en un 30% o más, según la Figura 4 mundial. Comparación de la precipitación acumulada utilizando los mismos datos que en las Figuras 2 y 3. 9 Organización Meteorológica (OMM) [12]. La

magnitud de estos errores depende en gran medida de las condiciones meteorológicas, especialmente la velocidad del viento y la intensidad de las precipitaciones, y puede ser causadas por [ibíd.]:

Deformación sistemática del campo de viento por encima del orificio del manómetro (2-10%)

Pérdida de humedad en las paredes internas del colector, así como pérdida de humedad en el contenedor cuando se vacía (2-15% en verano y 1-8% en invierno)

Evaporación del contenedor (0-4%)

Entrada y salida de agua (1-2%)

Errores mecánicos y de muestreo sistemáticos

Errores de efectos dinámicos (5-15%)

Errores aleatorios de observación e instrumentales

La solución de Arable para medir la precipitación es un enfoque completamente novedoso que evita algunas de las fuentes de error tradicionales descritas anteriormente. El Mark 2 utiliza un disdrómetro acústico patentado que capta el sonido de la lluvia [13]. El proceso de obtención de las cantidades de precipitación puede dividirse en dos pasos principales:

1. Los datos de audio se recopilan y analizan para determinar si la fuente del sonido es la lluvia o algo más.

2. Si se determina que se trata de precipitaciones, los datos de audio se transforman de manera que se identifican las gotas individuales, se clasifican según un esquema de rango de energía y luego se mapean en un contenedor de diámetro correspondiente. A partir de la distribución de las gotas a lo largo de contenedores de diámetro, podemos derivar una cantidad total de precipitación.

Ambas etapas en este proceso se ven reforzadas por el uso de algoritmos de clasificación y regresión ML que nos permiten llegar con mayor precisión y consistencia a la cantidad correcta de precipitación. Aunque estos modelos ya han logrado un éxito significativo, a menudo superando a otras estaciones meteorológicas de nivel comercial, seguirán evolucionando y mejorando con el tiempo al aprovechar los datos dinámicos y la plataforma ML de Arable.

TEMPERATURA DEL AIRE

La Figura 5 muestra la temperatura del aire para el Arable Mark 2, el Davis Vantage Pro2 y el METER ATMOS 41 (eje

y) frente a la referencia Vaisala HUMICAP® HMP155 con pantalla de radiación helicoidal (eje x).

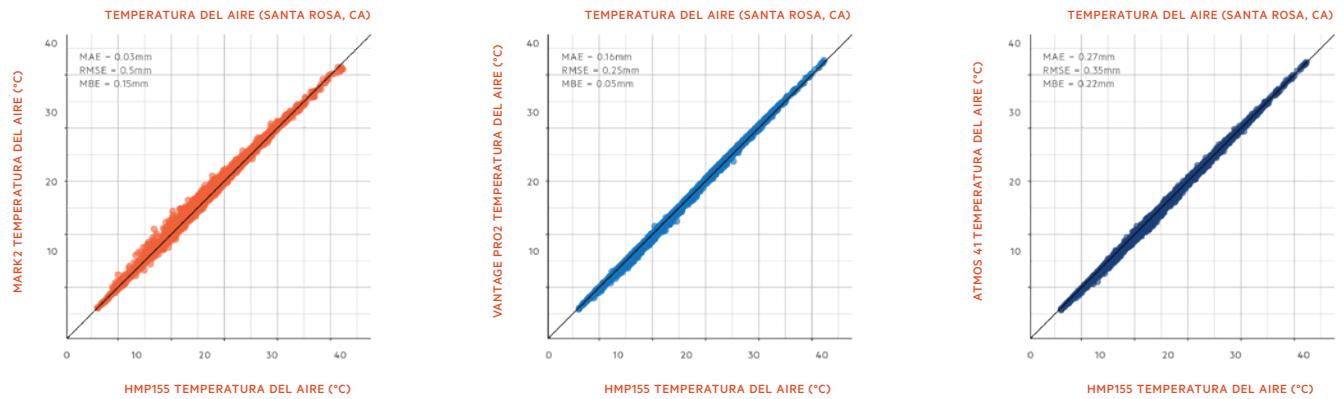


Figura 5. Comparación de la temperatura del aire en el sitio de Santa Rosa utilizando datos de octubre de 2019 a octubre de 2020.

Como se observa en la Figura 5, los tres dispositivos tienen un rendimiento muy similar en las tres métricas, con un MAE que oscila entre 0,160 C (Vantage Pro2) hasta 0,30 C (Mark 2). En particular, la diferencia de 0,030 C entre el Mark 2 y el ATMOS 41 es insignificante en términos de importancia física. Además, con todos los MAE a 0,30 C o menos, todos los dispositivos muestran temperaturas suficientemente precisas, con errores que

probablemente no tengan un impacto negativo en las aplicaciones agronómicas. También es importante tener en cuenta que, en determinados rangos de temperatura, estos resultados pueden variar ligeramente. Por ejemplo, a temperaturas de congelación y cercanas, el MAE de Mark 2 es de solo 0,140 C, mientras que los MAE de Vantage Pro2 y ATMOS 41 son de 0,170 C y 0,320 C, respectivamente.

HUMEDAD RELATIVA/DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR

La Figura 6 muestra la humedad relativa para el Arable Mark 2 y el Davis Vantage Pro2 (eje y) frente a la referencia Vaisala HUMICAP® HMP155 con pantalla de radiación helicoidal (eje x). Como se ve en la figura, el Mark 2 supera claramente al Vantage Pro2 con una reducción de

los errores que es hasta 9 veces mejor. Cabe destacar que el valor máximo de humedad relativa observado por el Vantage Pro2 es solo del 91%, a pesar de que estos datos cubren todo un año y ciertamente contienen algunas horas de lluvia.

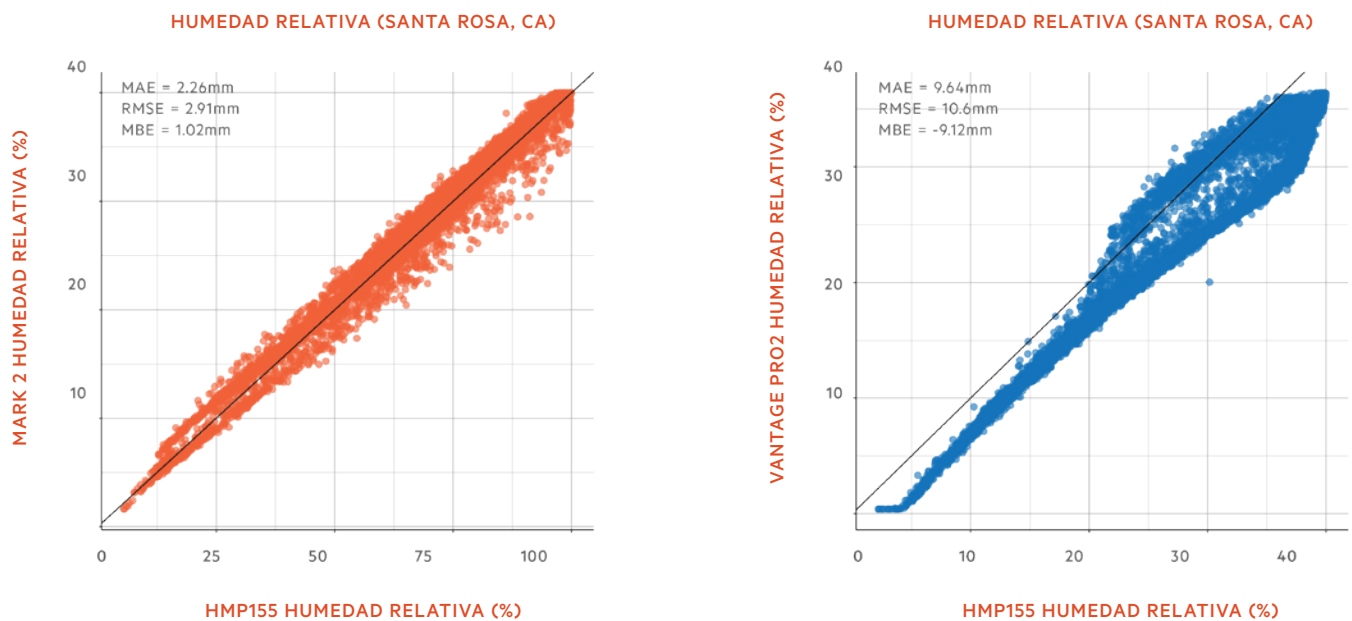


Figura 6. Comparación de la humedad relativa en el sitio de Santa Rosa utilizando datos de octubre de 2019 a octubre de 2020.

La Figura 7 muestra el déficit de presión de vapor para el Mark 2 y el ATMOS 41 (eje y) en comparación con la referencia Vaisala HUMICAP® HMP155 con pantalla de radiación helicoidal (eje x). El ATMOS 41 no proporciona la humedad relativa directamente, sino que proporciona el déficit de presión de vapor, una función de la temperatura del aire y la humedad

relativa. Por lo tanto, esta comparación está probando indirectamente la precisión de la humedad relativa, aunque notablemente los errores de la temperatura del aire también estarán presentes. Como se aprecia en la figura, el Mark 2 supera ligeramente al ATMOS 41 siendo la MBE de -0,01 kPa (Mark 2) a -0,06 kPa (ATMOS 41).

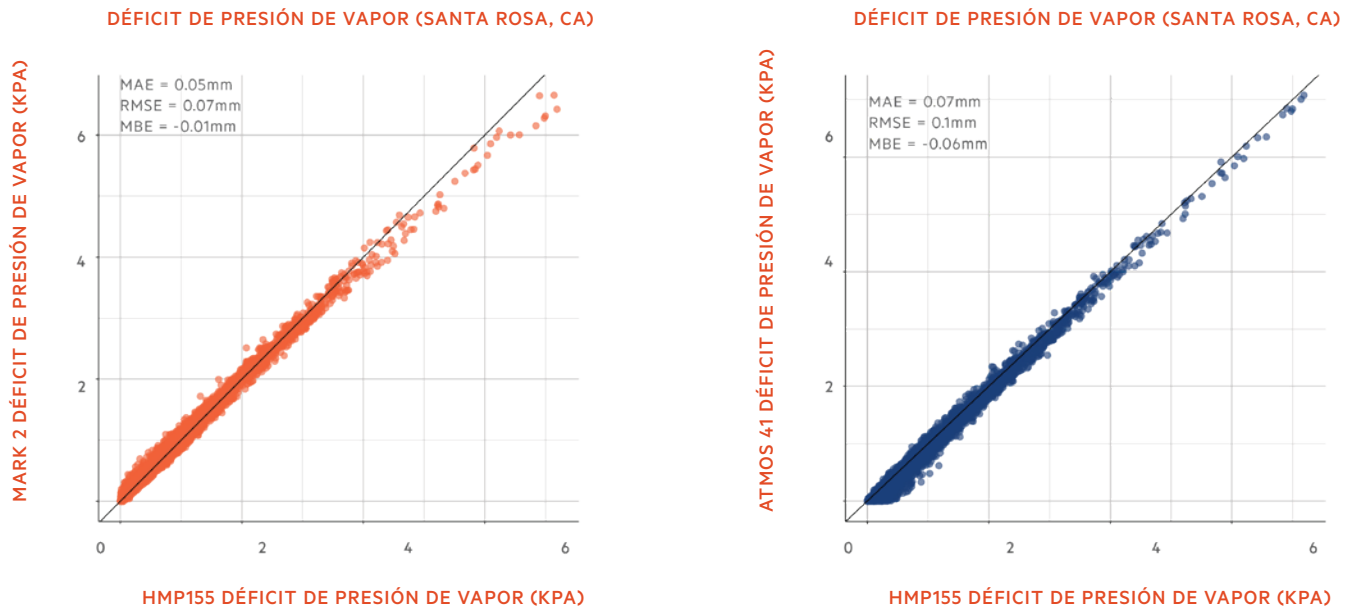


Figura 7. Comparación del déficit de presión de vapor en el sitio de Santa Rosa utilizando datos de octubre de 2019 a octubre de 2020.

CONCLUSIÓN

Según los resultados expuestos en este documento, está claro que el Arable Mark 2 es una alternativa competitiva a las estaciones meteorológicas tradicionales del mercado en cuanto a precisión de datos. Se demostró que el Mark 2 se compara bien con el Davis Vantage Pro2 y el METER ATMOS 41, y a veces los supera, en lo que respecta a la temperatura del aire, las precipitaciones y el déficit de humedad relativa/presión de vapor, utilizando dispositivos de referencia estándar como punto de referencia. En particular, el Mark 2 fue el más preciso de los tres dentro del rango de congelación de la temperatura del aire, en todas las mediciones de humedad relativa/déficit de presión de vapor, y en uno de los dos sitios de precipitación estudiados. En este sitio, el ATMOS 41 y el Vantage Pro2 quedaron atrás del Mark 2 con errores porcentuales que fueron aproximadamente 32 veces y 60 veces peores, respectivamente. Atribuimos este éxito a nuestro novedoso método de medición de la precipitación, que evita algunas de las fuentes de error típicas a las que están sujetos los métodos tradicionales.

Como líder en tecnología de monitoreo meteorológico y de cultivos y en análisis de datos, Arable se compromete a proporcionar herramientas potentes, pero asequibles, a las partes interesadas de todo el espectro agrícola. Nuestros ciclos de desarrollo no se limitan simplemente a

un hardware más nuevo y más caro, sino que también se centran en lanzamientos regulares de software que contienen actualizaciones automatizadas del modelo ML que maximizan el rendimiento en todas nuestras ofertas de funciones. No sólo es una forma más flexible y sostenible de desarrollar y construir tecnologías, sino que es menos costosa y nos permite fabricar productos más asequibles.

Lo más importante es que nuestras estrategias innovadoras, en particular el uso del ML, impulsan la mejora continua de los productos actuales y futuros de Arable. A medida que recopilamos más datos a través de la red Cal/Val, nuestra precisión mejora, lo que nos permite construir modelos más inteligentes que facilitan la toma de decisiones agrícolas basadas en datos. En pocas palabras, mejoramos con el tiempo. En este documento, hemos visto el éxito que estos modelos ya han alcanzado hasta la fecha, señalando que solo seguirán mejorando y estableciendo nuevos estándares para el monitoreo del clima y los cultivos. Aunque este documento trata específicamente de la aplicación del ML a nuestra base de mediciones principales, estas mediciones principales son la base de nuestros modelos agronómicos derivados, que son clave para la toma de decisiones agronómicas prácticas e informadas.

AGRADECIMIENTOS

Arable quiere dar las gracias a Rob Hamnet y Susan Cordell del Servicio Forestal de los Estados Unidos por ayudarnos a desplegar y mantener la instrumentación en Hilo, HI. Este sitio ha sido invaluable para nuestra recopilación de datos de precipitaciones desde 2018. Arable también quiere dar las gracias a los muchos otros socios, investigadores y colaboradores que contribuyen a la gran red Cal/Val. Puede que no hayamos utilizado directamente los datos de todos los sitios en este análisis, pero su apoyo ha sido, no obstante, primordial para los esfuerzos de investigación y desarrollo de Arable y su éxito continuo.

REFERENCES

- [1] Wikipedia contributors. (2020, November 19). Machine learning. Retrieved November 19, 2020, from Wikipedia, The Free Encyclopedia website: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Machine_learning&oldid=989487893
- [2] AmeriFlux: Measuring carbon, water and energy flux across the Americas. (n.d.) <https://ameriflux.lbl.gov/>
- [3] Vantage Pro2. (2019, October 23). <https://www.davisinstruments.com/vantage-pro2/>
- [4] Weather station for research. (2016, October 25). <https://www.metergroup.com/environment/products/atmos-41-weather-station/>
- [5] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.
- [6] Garner, R. (2015). NASA's Goddard Space Flight Center. <https://www.nasa.gov/goddard>
- [7] National Renewable Energy Laboratory (NREL) home page. (n.d.). <https://www.nrel.gov/>
- [8] OTT Parsivel² Laser Present Weather Sensor. (n.d.). <https://www.otthydromet.com/en/p-ott-parsivel-laser-present-weather-sensor/70.210.002.3.0>
- [9] HUMICAP[®] Humidity and Temperature Probe HMP155. (n.d.). <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/hmp155>
- [10] RADIATION SHIELDS — BARANI DESIGN Technologies. (n.d.). <https://www.baranidesign.com/radiation-shields>
- [11] CNR4 Net Radiometer. (n.d.). <https://www.kippzonen.com/Product/85/CNR4-Net-Radiometer>
- [12] World Meteorological Organization (WMO). (2018). Guide to Instruments and Methods of Observation: Volume I – Measurement of Meteorological Variables, pp. 221–223. Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10179
- [13] Wolf, L. A., Siegfried, B. J., Smith, A. L. (2018). Disdrometer having acoustic transducer and methods thereof. U.S. Patent No. 10578772B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

