



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ESTÁNDAR FAO PENMAN-MONTEITH EN
UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o)

Línea de investigación:

Biodiversidad, ecología y conservación

Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Caycho Bustamante, Juan José

Asesora:

Aylas Humareda, María del Carmen

(ORCID: 0000-0002-2063-0005)

Jurado:

Gómez Escriba, Benigno Paulo

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima - Perú

2023



IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ESTÁNDAR FAO PENMAN-MONTEITH EN UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o)

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

13%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	es.scribd.com Fuente de Internet	3%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1%
4	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	1library.co Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
8	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ESTÁNDAR FAO PENMAN-MONTEITH EN
UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET₀)**

Línea de Investigación:

Biodiversidad, Ecología y Conservación

Trabajo de Suficiencia Profesional

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Caycho Bustamante, Juan José

Asesora:

Aylas Humareda, María del Carmen
(ORCID: 0000-0002-2063-0005)

Jurado:

Gómez Escriba, Benigno Paulo
Vásquez Aranda, Ahuber Omar
Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima – Perú

2023

DEDICATORIA

A Dios porque siempre está presente en mi vida
y me ha ayudado a superar momentos difíciles.

A mis padres Maura y José Enrique,
a mi tía Celestina, mis tías(os) presentes y
aquellos que ya partieron al lado de Dios,
a mis hermanas(os) y a mi Julliana,
por sus cariños y apoyos incondicionales
para alcanzar este objetivo profesional.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Federico Villarreal, mi alma mater, porque me brindó la oportunidad de desarrollarme y adquirir los primeros conocimientos de esta amplia y hermosa carrera, y que ahora me permite obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental.

A mi asesora Dra. María del Carmen Aylas Humareda, por su tiempo, asesoría y colaboración durante el proceso final para la obtención del título profesional.

A los profesionales y amistades que a lo largo de estos años he logrado conocer, con quienes compartimos conocimientos en el campo de esta especialidad, conocimientos que contribuyeron en mi formación profesional.

A la empresa AWS Consulting S.A.C., con quienes compartimos varios años de vida y de experiencia profesional.

A la empresa Shahuindo S.A.C. y sus profesionales del área de Gestión Ambiental de UM Shahuindo, por permitirme usar parte de su información técnica y meteorológica de su estación automática para el desarrollo y análisis de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	11
Abstract	12
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Trayectoria del autor	13
1.1.1 Grado académico	15
1.1.2 Experiencia y cualificación profesional	15
1.2 Descripción de la empresa	17
1.2.1 Datos generales de la empresa	17
1.2.2 Presentación de la empresa	17
1.2.2.1 Visión de la empresa	18
1.2.2.2 Misión de la empresa.....	18
1.3 Organigrama de la empresa	18
1.4 Áreas y funciones desempeñadas	19
II. DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA	22
2.1 Generalidades	24
2.1.1 Antecedentes	24
2.1.2 Descripción del problema.....	25
2.1.3 Objetivos	27
2.1.3.1 Objetivo general.....	27
2.1.3.2 Objetivos específicos.....	27
2.2 Marco Teórico	28
2.2.1 Términos y definiciones	28
2.2.1.1 Estación meteorológica automática (EMA).....	28
2.2.1.2 Estándar.....	28
2.2.1.3 Estandarización.....	28
2.2.1.4 Evaporación	28
2.2.1.5 Evapotranspiración (ET)	29
2.2.1.6 Evapotranspiración de referencia (ETo).....	29
2.2.1.7 Exactitud (de una medición)	30
2.2.1.8 Incertidumbre.....	30
2.2.1.9 Instrumento de medición.....	30
2.2.1.10 Resolución.....	30

	2.2.1.11	Sensor.....	30
	2.2.1.12	Superficie de referencia.....	30
	2.2.1.13	Transpiración.....	31
	2.2.1.14	Variables climáticas.....	31
2.3		Descripción del área de estudio.....	32
	2.3.1	Localización de la EMA Shahuindo.....	32
	2.3.2	Vías de comunicación.....	32
	2.3.3	Geología y geomorfología.....	33
	2.3.4	Fisiografía.....	34
	2.3.5	Hidrografía.....	34
	2.3.6	Medio social.....	34
	2.3.6.1	Demografía.....	34
	2.3.6.2	Educación.....	35
	2.3.6.3	Salud.....	35
	2.3.6.4	Empleo y actividades económicas.....	35
	2.3.6.5	Vivienda e infraestructura social.....	35
	2.3.7	Zonas de vida.....	36
	2.3.8	Clima y meteorología.....	36
	2.3.8.1	Temperatura ambiental.....	37
	2.3.8.2	Humedad relativa ambiental.....	39
	2.3.8.3	Radiación neta.....	41
	2.3.8.4	Presión atmosférica.....	44
	2.3.8.5	Velocidad del viento.....	46
	2.3.8.6	Dirección del viento.....	49
	2.3.8.7	Precipitación.....	52
	2.3.8.8	Evapotranspiración.....	54
2.4		Metodología para implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA.....	56
	2.4.1	Base legal y guías para instalación de estaciones meteorológicas automáticas.....	57
	2.4.1.1	Criterios técnicos para instalación de una EMA.....	58
	2.4.1.2	Densidad de instalación de estaciones.....	61
	2.4.2	Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia - ETo.....	62

2.4.2.1	Método estándar FAO Penman-Monteith	63
2.4.2.2	Método del Tanque de evaporación Clase A	69
2.4.2.3	Método Hargreaves	74
2.4.3	Instrumentación y software para la implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA	75
2.4.3.1	Hardware e infraestructura para instalación de una EMA.....	76
2.4.3.2	Softwares de soporte.....	94
2.4.4	Desarrollo e implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en lenguaje de programación basic para una EMA	104
2.4.4.1	Explicación y desarrollo de la ecuación FAO Penman-Monteith en lenguaje de programación Basic del Editor CRBasic.....	107
2.4.4.2	Ejemplo de determinación de la ETo con datos horarios:	111
2.5	Análisis y comparación de resultados.....	113
2.5.1	Comportamiento horario de la ETo – EMA Shahuindo.....	113
2.5.2	Comportamiento mensual de la ETo – EMA Shahuindo	114
2.5.3	Calibración de la ETo_Epan del Tanque de evaporación	115
2.5.4	Comparativo de diagrama de cajas de resultados ETo.....	117
III.	APORTES MÁS DESTACADOS A LA EMPRESA	120
IV.	CONCLUSIONES	121
V.	RECOMENDACIONES.....	123
VI.	REFERENCIAS	125
VII.	ANEXOS	128

ANEXOS

ANEXO A - MAPA DE UBICACIÓN - EMA SHAHUINDO

ANEXO B - RESUMEN DE REGISTROS METEOROLÓGICOS MENSUALES (2018 - 2022) - EMA SHAHUINDO

ANEXO C - PLANOS DE INSTALACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES - EMA

ANEXO D - PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN DEL MÉTODO ESTÁNDAR ETo EN EL REGISTRADOR DE UNA EMA

ANEXO E - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REGISTRADOR DE DATOS PARA UNA EMA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coordenadas de ubicación de la EMA Shahuindo.	32
Tabla 2	Resumen mensual de parámetros meteorológicos periodo 2018 al 2022, EMA Shahuindo.	37
Tabla 3	Temperatura ambiental promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	38
Tabla 4	Humedad relativa promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	40
Tabla 5	Radiación neta promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	42
Tabla 6	Presión atmosférica promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	44
Tabla 7	Velocidad del viento promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	46
Tabla 8	Dirección del viento promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	50
Tabla 9	Precipitación acumulada - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	52
Tabla 10	Evapotranspiración acumulada - años 2018-2022, EMA Shahuindo.	54
Tabla 11	Resumen de criterios de instalación de una EMA.	59
Tabla 12	Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie en km ² por estación) según OMM	62
Tabla 13	Especificaciones técnicas EMA Shahuindo	77
Tabla 14	Tipos de sensores meteorológicos para una EMA	83
Tabla 15	Resumen de características técnicas de los sensores meteorológicos según US EPA, OMM y SENAMHI.	86
Tabla 16	Parámetros horarios evaluados en una EMA	87
Tabla 17	Actividades y responsables para instalación de un EMA.	89
Tabla 18	Características técnicas – Equipo de cómputo para softwares	95
Tabla 19	Ejemplo de determinación horaria de la ETo FAO Penman-Monteith	112
Tabla 20	Resultados de diagramas de cajas de ETo – EMA Shahuindo.	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Organigrama de la empresa AWS	19
Figura 2	Principales problemas observados en el método del Tanque de evaporación Clase A	26
Figura 3	Factores que influyen en la ETo	29
Figura 4	Características de una superficie de referencia	31
Figura 5	Vía de comunicación a la UM Shahuindo	33
Figura 6	Comportamiento horario de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo	38
Figura 7	Comportamiento mensual de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo	39
Figura 8	Comportamiento anual de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo	39
Figura 9	Comportamiento horario de la humedad relativa – EMA Shahuindo	40
Figura 10	Comportamiento mensual de la humedad relativa – EMA Shahuindo	41
Figura 11	Comportamiento anual de la humedad relativa – EMA Shahuindo	41
Figura 12	Comportamiento horario de la radiación neta – EMA Shahuindo	42
Figura 13	Comportamiento mensual de la radiación neta – EMA Shahuindo	43
Figura 14	Comportamiento anual de la radiación neta – EMA Shahuindo	43
Figura 15	Comportamiento horario de la presión atmosférica – EMA Shahuindo	45
Figura 16	Comportamiento mensual de la presión atmosférica – EMA Shahuindo	45
Figura 17	Comportamiento anual de la presión atmosférica – EMA Shahuindo	46
Figura 18	Comportamiento horario de la velocidad del viento – EMA Shahuindo	47
Figura 19	Comportamiento mensual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo	47
Figura 20	Comportamiento anual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo	48
Figura 21	Distribución porcentual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo	48
Figura 22	Rosa de viento predominante – EMA Shahuindo	49
Figura 23	Comportamiento horario de la dirección del viento – EMA Shahuindo	50
Figura 24	Comportamiento mensual de la dirección del viento – EMA Shahuindo	51
Figura 25	Comportamiento anual de la dirección del viento – EMA Shahuindo	51
Figura 26	Comportamiento horario de la precipitación – EMA Shahuindo	53
Figura 27	Comportamiento mensual de la precipitación – EMA Shahuindo	53
Figura 28	Comportamiento anual de la precipitación – EMA Shahuindo	54
Figura 29	Comportamiento horario de la evapotranspiración de referencia – EMA Shahuindo	55

Figura 30	Comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia – EMA Shahuindo	55
Figura 31	Metodología de implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA	56
Figura 32	Distancia recomendada de la EMA y el obstáculo cercano	60
Figura 33	Vista de instalación de una EMA con torre de 10 metros	61
Figura 34	Tanque de evaporación Clase A según FAO-56	70
Figura 35	Tanque de evaporación Clase A con sensor electrónico	71
Figura 36	Casos de Localización del Tanque de Evaporación Clase A para determinar el Kp	72
Figura 37	Tanque de evaporación Clase A situado sobre gramínea Caso A.....	73
Figura 38	Tanque de evaporación Clase A situado en suelo desnudo Caso B	73
Figura 39	Vista de la EMA Shahuindo y sus componentes.....	78
Figura 40	Registadores de datos modelos CR1000 y CR1000X de Campbell Scientific	81
Figura 41	Gabinete del registrador de datos – EMA Shahuindo	82
Figura 42	Vista del mantenimiento rutinario del Tanque de evaporación Clase A.....	92
Figura 43	Revisión de los niveles de agua recomendados en el Tanque de evaporación Clase A	92
Figura 44	Ventana del software Short Cut – Programación básica de una EMA.....	97
Figura 45	Ventana del software Editor CRBasic– Programación básica/avanzada de un EMA	98
Figura 46	Ventana de ayuda del software Editor CRBasic	99
Figura 47	Ventana del software VisualWeather – Descarga de datos de un EMA	102
Figura 48	Pantalla gráfica de telemetría de datos RTMC – EMA Shahuindo.....	103
Figura 49	Pantalla gráfica de telemetría de datos de ETo – EMA Shahuindo	103
Figura 50	Método Estándar ETo – FAO Penman Monteith en lenguaje de programación Basic	106
Figura 51	Comportamiento Horario Multianual de la ETo	114
Figura 52	Comportamiento mensual multianual de ETo.....	115
Figura 53	Regresión lineal de la ETo_FAO-PM vs ETo_Epan.....	116
Figura 54	Comportamiento mensual de la ETo_FAO-PM vs. ETo_EpanCL.....	117
Figura 55	Comparación de diagramas de cajas de ETo.....	119

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

AWS	AWS Consulting S.A.C.
EMA	Estación Meteorológica Automática.
ETo	Evapotranspiración de referencia.
ETo_FAO-PM	Evapotranspiración de referencia según FAO Penman-Monteith.
ETo_Epan	Evapotranspiración de referencia del tanque de evaporación Clase A.
ETo_Harg	Evapotranspiración de referencia obtenida según el método de Hargreaves.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
OEFA	Organismo de la Evaluación y Fiscalización Ambiental.
SENACE	Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles.
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
UNFV	Universidad Nacional Federico Villarreal.
US EPA	U.S. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

Resumen

El presente trabajo de suficiencia profesional, tiene como objetivo principal, la implementación del método estándar “FAO Penman-Monteith” en una estación meteorológica automática (EMA) para la determinación en los registros horarios de la evapotranspiración de referencia (ET_o) según el estudio FAO-56 de Riego y Drenaje, considerando que la ET_o es uno de los parámetros básicos e importantes en la evaluación, gestión y uso del recurso hídrico en la agricultura, en los procesos de las actividades económicas, en estudios hidrológicos y climáticos. El motivo de esta implementación se basó en la limitada información de evaporación (Epan) obtenida del tanque de evaporación Clase A que generalmente requiere mayor atención y logística cuando la EMA se instala en zonas remotas, y en la necesidad de utilizar alternativamente un método estándar para determinar la ET_o con los parámetros meteorológicos medidos por la EMA. El autor a través de este trabajo, estructurado de acuerdo al anexo IV del reglamento general de grados y títulos de la Universidad Nacional Federico Villarreal, desarrolla la metodología de implementación del método estándar de la FAO para determinar la ET_o horario realizado en la EMA Shahuindo ubicada en el departamento de Cajamarca en Perú, proporciona los alcances normativos y técnicos, compara los resultados del método estándar con los métodos opcionales recomendados por la FAO, finalmente presenta las conclusiones y recomendaciones respectivas en base a la experiencia profesional adquirida desde el año 2003 en estudios de monitoreo ambiental, instalación e implementación de redes de monitoreo meteorológico y calidad ambiental del aire.

Palabras Claves: evapotranspiración de referencia (ET_o), FAO Penman-Monteith, estación meteorológica automática (EMA).

Abstract

The main objective of this professional work is the implementation of the “FAO Penman-Monteith” standard method in an automatic weather station (aws) for the determination in the hourly records of the reference evapotranspiration (ET_o) according to the FAO-56 study of Irrigation and Drainage, considering that ET_o is one of the basic and important parameters in the evaluation, management and use of water resources in agriculture, in the processes of economic activities, in hydrological and climatic studies. The reason for this implementation was based on the limited evaporation information (Epan) obtained from the Class A evaporation tank that generally requires greater attention and logistics when the station is installed in remote areas, and on the need to alternatively use a standard method to determine the ET_o with the meteorological parameters measured by the aws. The author, through this work, structured according to Annex IV of the general regulations for degrees and titles of the Universidad Nacional Federico Villarreal, develops the methodology for implementing the FAO standard method to determine the ET_o schedule carried out at the automatic weather station Shahuindo located in the department of Cajamarca in Peru, provides the normative and technical scope, compares the results of the standard method with the optional methods recommended by the FAO, finally presents the respective conclusions and recommendations based on the professional experience acquired since 2003 in studies environmental monitoring, installation and implementation of meteorological monitoring networks and environmental air quality.

Keywords: reference evapotranspiration (ET_o), FAO Penman-Monteith, automatic weather station (aws).

I. INTRODUCCIÓN

En cumplimiento al procedimiento para la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental por la modalidad de Suficiencia Profesional, el autor ha desarrollado el presente trabajo de título “Implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una estación meteorológica automática para la determinación de la evapotranspiración del cultivo referencia o evapotranspiración de referencia (ET_o)”, cuya estructura se basa en el Anexo IV del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), aprobado mediante Resolución Rectoral N° 2900-2018-CU-UNFV el 25 de junio del 2018, el cual se encuentra enmarcado dentro de la Ley Universitaria N° 30220.

1.1. Trayectoria del autor

El autor, es Bachiller en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV). Cuenta con más de 18 años de experiencia en instituciones privadas, en donde se especializó en estudios de monitoreo ambiental de calidad de aire, meteorología, ruido, radiaciones no ionizantes y otros aspectos de la ingeniería ambiental acorde con la normativa ambiental vigente.

Durante el periodo de 07 de febrero al 31 de julio 2003, realizó practicas pre-profesionales en la Unidad de Vigilancia y Monitoreo de la Calidad del Aire de la Dirección de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica de la Dirección Ejecutiva de Ecología y Protección del Medio Ambiente (DEEPA) en la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud.

Del 01 de mayo 2005 al 31 julio del 2021, estuvo laborando en la empresa AWS Consulting S.A.C (en adelante AWS), donde ha desarrollado varias actividades como jefe de Calidad de Aire y Ruido, desempeñando el cargo de coordinador, supervisor, asesoría de proyectos y estudios de monitoreo ambiental, teniendo la oportunidad de laborar en conjunto a otros profesionales de la misma especialidad de ingeniería ambiental y de otras especialidades.

El autor ha sido responsable de estudios de monitoreo ambientales en calidad de aire, ruido ambiental y ocupacional, meteorología y emisiones gaseosas para empresas pertenecientes a los sectores de la producción, minería, electricidad, hidrocarburos e industria en calidad de contratista en AWS:

- Shahuindo S.A.C. – UM Shahuindo
- Agroindustrial Paramonga S.A.A.
- Cía. Minera Antamina S.A.– Mina Antamina y Puerto Punta Lobitos
- Xstrata Tintaya S.A. – Mina Tintaya
- Xstrata Tintaya S.A. – Proyectos Las Bambas, Antapaccay y Corocohuayco
- Minera Barrick Misquichilca S.A. - Unidad Pierina y Lagunas Norte
- Barrick - Pueblo Viejo Dominicana Corp – Proyecto Pueblo Viejo
- Gold Fields La Cima S.A.A. – Unidad Minera Cerro Corona
- Cía. Minera Barbastro S.A.C. - Mina Marta
- Minera Sillustani S.A. - Proyecto Regina
- Minsur S.A. – Proyecto Pucamarca
- Lumina Copper S.A. –Terminal Eten y Proyecto El Galeno
- Savia Perú – Lote Z-2B y Lote Z-6
- Minsur S.A. – Unidad Minera San Rafael
- Compañía Owens Illinois S.A. – Planta de Vidrios

Desde octubre 2021 a la fecha se encuentra laborando como consultor externo para la empresa AWS, y otras instituciones, donde realiza actividades de consultoría técnica ambiental.

El autor cuenta con estudios en Sistemas de Información Geográfica (SIG), conocimientos de lenguaje de programación en VBA (Visual Basic para Aplicaciones), Python básico y ofimática a nivel intermedio. Cuenta con el idioma portugués certificado a nivel básico del Centro de Idiomas de la UNFV.

1.1.1. Grado académico

Desde el 25 de setiembre del 2003, el autor cuenta con el grado de Bachiller en Ingeniería Ambiental otorgado por el Consejo Universitario de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) - Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo.

El diploma de bachiller se encuentra inscrito en el libro N° 88, folio N° 98 y en el registro N° 65397; de la Oficina de Grados y Títulos de la Secretaría General de la UNFV e inscrito con Resolución N° 6835 en el Registro Nacional de Grados y Títulos administrada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) del Perú.

1.1.2. Experiencia y cualificación profesional

El autor, cuenta con una cualificación profesional desde el año 2003, ha tenido a cargo la programación y ejecución de monitoreos ambientales aire, ruido, emisiones y radiaciones no ionizantes, instalación y asesoría técnica de equipos de monitoreo ambiental que cumplan con los requisitos y procedimientos establecidos en los protocolos de monitoreo ambiental acorde con la normativa ambiental vigente del Perú, asimismo cuenta con conocimientos en temas de seguridad y salud ocupacional relacionados a la supervisión y ejecución de las actividades de campo con cero accidentes en el puesto de trabajo en industria y minería.

El autor cuenta con las siguientes principales certificaciones profesionales adquiridos en su trayectoria:

- Procesamiento de Imágenes con GIS Erdas Imagine, organizado por las empresas Telematica y Leica Geosystems, desarrollado del 25 al 26 de agosto del 2004, con una duración de 16 horas.
- Entrenamiento en formación de expertos en ruido en la industria y minería, desarrollado por las empresas Higseg E.I.R.L. y Quest Technologies Inc, desarrollado del 16 al 18 de abril del 2007, con una duración de 40 horas lectivas.

- Capacitación en calibración de termómetros digitales, organizado por el Servicio Nacional de Metrología de INDECOPI, desarrollado del 07 al 16 de mayo del 2012.
- Micrometeorología aplicada del programa de Pre-Maestría 2011/2012, organizado por la Escuela de Post-Grado de la Especialidad de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, desarrollado del 12 al 20 de enero del 2012, con una duración de 20 horas lectivas.
- Evaluación y gestión de la calidad del aire – medidas de mitigación, organizado por el Capítulo de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del Colegio de Ingenieros del Perú, desarrollado en Lima en noviembre del 2013, con una duración de 48 horas lectivas.
- Entrenamiento en Software AERMOD Air Dispersion Modeling, desarrollado por la empresa Lakes Environmental y E&E Perú S.A. en la ciudad de Lima, durante los días 15 y 16 de setiembre del 2014, con una duración de 16 horas lectivas (2 días).
- Estándares de calidad ambiental (ECA), Límites máximos permisibles (LMP) y Legislación ambiental: agua, ruido, aire, suelo y residuos sólidos, organizado por el Centro de Gestión y Tecnología Ambiental del departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología de la Universidad Nacional Agraria La Molina, desarrollado del 19 de junio al 01 de julio del 2017, con una duración de 28 horas lectivas.
- Geoprocesamiento en ARCGIS con scripts usando lenguaje de programación Python, desarrollado por las empresas Telematica y Esri, durante los días del 24 al 26 de julio del 2017, con una duración de 24 horas lectivas.

1.2. Descripción de la empresa

1.2.1. Datos generales de la empresa

- Razón Social: AWS Consulting S.A.C.
- RUC: 20507628231.
- Página Web: <https://www.awsperu.com>
- Fecha Inicio Actividades: 12/11/2003
- Dirección Legal: Calle Cnel. Bruno Morales Bermúdez N°241, Urb. Las Gardenias, Santiago de Surco – Lima – Perú.

1.2.2. Presentación de la empresa

AWS es una empresa de consultoría multidisciplinaria con más de 19 años de amplia experiencia en el campo ambiental, asesorando tanto al sector privado como a organizaciones públicas y sociedad civil, brindando servicios integrales de consultoría.

AWS se encuentra inscrita como consultora ambiental en el Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las inversiones Sostenibles del Perú (SENACE), con resolución directoral N°344-2017-SENACE/DRA de fecha 12 de julio 2017.

Su objetivo es brindar servicios de alta calidad que permitan a los clientes alcanzar de manera eficiente los objetivos de sus proyectos a través de una adecuada planificación integral y un estricto cumplimiento de las normas nacionales e internacionales.

Aporta un conocimiento profundo de la legislación ambiental aplicable en el país y adecua técnicamente los proyectos de sus clientes a la normativa vigente.

Los servicios proporcionados por AWS con experiencia y conocimientos incluyen:

- Comercialización de equipos ambientales e insumos para el control y remediación ambiental.
- Elaboración de instrumentos de gestión ambiental.

- Estudio y proyectos de gestión residuos sólidos.
- Mantenimiento y verificación de calibración de estaciones meteorológicas, calidad de aire y pluviométricas.
- Procesamiento de registros meteorológicos.
- Monitoreos ambientales (aire, ruido, RNI, agua, biológico, suelo).

1.2.2.1. Visión de la empresa

- Ser una consultora ambiental nacional e internacional y brindar servicios y productos de calidad.
- Ser líderes en el mercado que nos permita celebrar convenios de cooperación interinstitucional con organismos públicos y privados para lograr nuestros objetivos comunes.

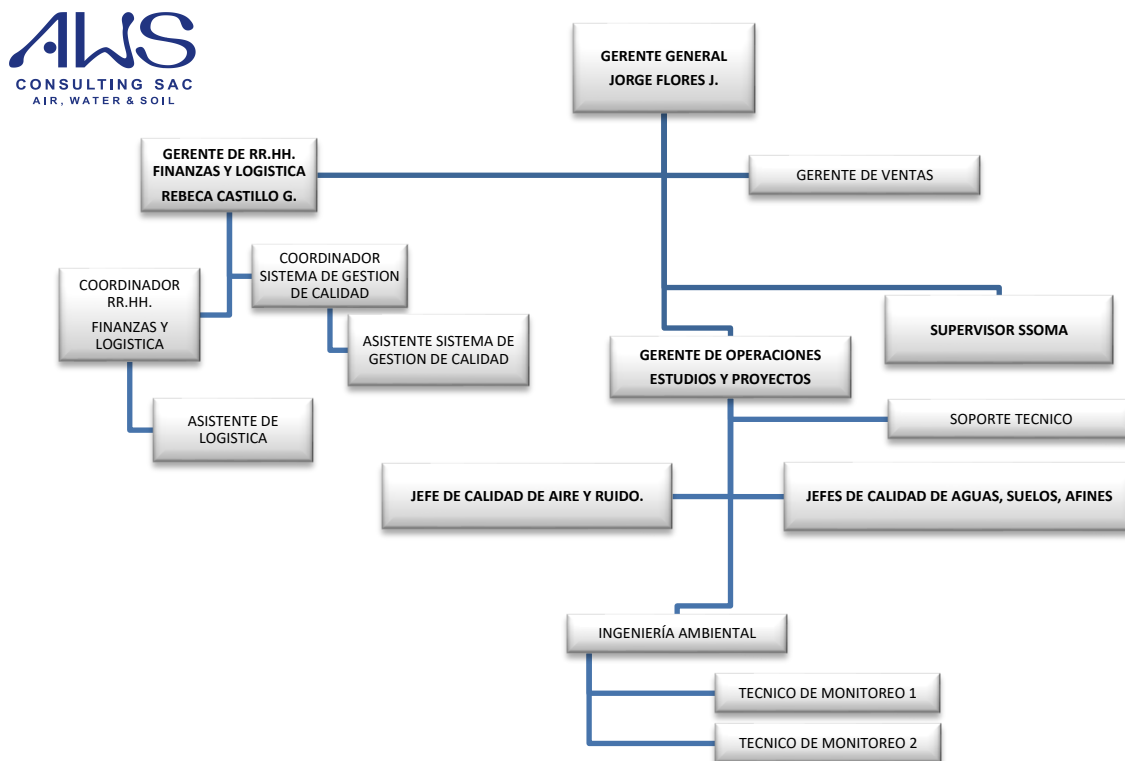
1.2.2.2. Misión de la empresa

- Contribuir a la mejora de nuestro entorno, crear un entorno sano y digno para nuestras generaciones futuras y disfrutar de un entorno limpio.
- Brindar a nuestros clientes experiencia y profesionalismo para satisfacer sus necesidades y expectativas.

1.3. Organigrama de la empresa

AWS tenía el siguiente organigrama en las cuales se basaba el desarrollo de sus actividades hasta el año 2021 (véase Figura 1), fecha en la que el autor estuvo laborando en el cargo de jefe de Calidad de Aire y Ruido.

Actualmente el autor, se encuentra brindando servicios profesionales a AWS en calidad de consultor externo.

Figura 1*Organigrama de la empresa AWS*

Nota: Organigrama interno de AWS Consulting S.A.C, año 2021.

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

El autor ha desempeñado las siguientes labores y funciones en AWS bajo la gerencia de Estudios y Proyectos (Medio Ambiente, Seguridad y Equipos de Monitoreo):

- **Supervisor de monitoreos ambientales:**

El autor generalmente realizó estas labores en campo y/o en las instalaciones de los clientes:

- Coordinación y reporte de avance de actividades diarias de los proveedores y colaboradores, con la finalidad de evitar o prevenir imprevistos en el cumplimiento del servicio.
- Liderar con el cumplimiento y hacer cumplir los procedimientos, normas legales vigentes y políticas relacionadas con la empresa y los clientes; durante el desarrollo

de las actividades de monitoreo ambiental; considerando los aspectos en seguridad en el trabajo, salud del trabajador y medio ambiente.

- Apoyó en la revisión y modificación de documentos con el área de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente (SSOMA), de las matrices de identificación de peligros, la evaluación de riesgos y establecimiento de medidas de control (IPERC), matriz IPERC Línea Base, plan de manejo ambiental, plan de respuestas a emergencia de acuerdo a los criterios y estándares de cada cliente y la normativa legal.
- Realizó coordinaciones para el manejo y traslado de muestras ambientales a los laboratorios acreditados por los respectivos ensayo y análisis.
- Realizó supervisiones de campo para la evaluación y factibilidad de implementación o repotenciación de redes de monitoreo ambiental, con equipos automáticos, con la finalidad de obtener y compilar información técnica que permita proporcionar las opciones adecuadas de solución.

- **Jefe de calidad de aire y ruido:**

El autor realizó de manera general las siguientes labores en AWS:

- Coordinación, para el desarrollo y evaluación de estudios y proyectos en monitoreos de calidad ambiental de aire, ruido, meteorología, emisiones gaseosas y radiaciones no ionizantes según normativa vigente.
- Concertar y participar de las reuniones previas con los supervisores, técnicos, personal colaborador para definir y coordinar el plan de ejecución de los trabajos de monitoreo ambiental con los clientes con la finalidad de planificar actividades y asignar recursos.
- Coordinación, revisión y modificación con el supervisor SSOMA, personal supervisor y técnicos de monitoreo involucrados en las actividades específicas, para

las revisiones y modificaciones de las matrices IPERC Línea Base, planes de manejo ambiental, planes de respuestas a emergencia de acuerdo a los criterios y estándares de cada cliente y la normativa legal.

- Revisión, programación, instalación, auditoría y soporte de equipos de monitoreo de calidad ambiental de los clientes y de los equipos de monitoreo ambiental de AWS, acorde con los manuales de los fabricantes, guías y procedimientos Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, siglas en inglés) y Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Protocolo para la Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas, Agrometeorológicas e Hidrológicas del SENAMHI de Perú (en adelante protocolo nacional de SENAMHI).
- Solicitar órdenes de compra y coordinar la adquisición de materiales y equipos para el desarrollo de las actividades del área de monitoreo ambiental.
- Coordinaciones con los laboratorios de ensayos físico químicos para el reporte de los resultados de los monitoreos ambientales.
- Elaboración, desarrollo y reporte de informes finales de monitoreo ambiental al cliente, asimismo la absolución de consultas posteriores.
- Manejo de software meteorológicos y análisis de contaminantes en calidad del aire, los cuales se aplicaron en los estudios de monitoreo ambiental.
- Gestión de información resultados de monitoreo ambiental y apoyo en su representación en planos temáticos con softwares GIS.
- Atención al cliente en consultorías técnicas de las actividades a realizar y en estudios relacionados a su carrera de Ingeniería Ambiental.
- Identificar las necesidades actuales de la empresa y proponer alternativas de mejora continua.

II. DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA

El presente trabajo de suficiencia profesional describe las actividades de implementación del método estándar de FAO Penman-Monteith en una estación meteorológica automática (EMA) para la determinación horaria de la evapotranspiración referencia (ET_o) descrito en la guía N°56 de la Serie Riego y Drenaje de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA, o más conocida como FAO, titulada "Evapotranspiración del cultivo - Guías para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo" (en adelante FAO-56).

La implementación que se presenta en este informe, forma parte de un largo proceso de desarrollo e investigación iniciada por el autor desde el año 2010, como parte de una preocupación observada cuando se revisaban los registros limitados de tasa evaporación obtenidos con el método del tanque de evaporación Clase A (Epan, siglas en inglés de evaporation pan) como parte de sus labores en la empresa AWS y en las distintas estaciones instaladas de nuestros clientes.

Para el desarrollo de este trabajo, el autor utilizó referencialmente la información técnica y registros horarios de la estación meteorológica automática Shahuindo (en adelante EMA Shahuindo), la cual se encuentra ubicada en las instalaciones de la Unidad Minera Shahuindo de propiedad de SHAHUINDO S.A.C. (UM Shahuindo), quienes brindaron al autor, el consentimiento de uso de su información meteorológica y técnica con fines académicos.

Esta sección de *descripción de la actividad específica*, se encuentra estructurado de la siguiente manera:

- a) El primer capítulo, el autor, proporciona las generalidades y objetivos de este trabajo.

- b) El segundo capítulo presenta el marco teórico donde se definen los términos y conceptos relacionados a la ETo y a una EMA.
- c) El tercer capítulo, describe la ubicación y entorno de instalación de la EMA Shahuindo, asimismo en esta sección se presenta y describen las variables meteorológicas registradas y procesadas de esta estación del periodo de evaluación de enero 2018 a diciembre del 2022.
- d) El cuarto capítulo se describe la metodología de implementación, donde se presenta el marco legal y criterios de instalación de una EMA, según las recomendaciones de las guías principales como la OMM, US EPA y protocolo nacional de SENAMHI, se describe los métodos de determinación de la ETo; el método estándar FAO Penman-Monteith y los métodos opcionales recomendados por la FAO de Hargreaves y del tanque de evaporación Clase A; posteriormente se describe las características técnicas (hardware) de los instrumentos y software de soporte que debe contar una EMA, con la finalidad de diseñar el programa en lenguaje Basic que permita determinar de manera automática el valor ETo según el método estándar de FAO Penman-Monteith.
- e) En el quinto capítulo de esta sección, se incluye los resultados y discusión, donde se presenta el análisis de los resultados de ETo obtenidos en base a la información meteorológica procesada de la EMA Shahuindo, periodo 2018 al 2022, con el método estándar de FAO Penman-Monteith y se compara con los métodos opcionales del tanque de evaporación Clase A y Hargreaves recomendados por la FAO, asimismo, se incluye la calibración de los resultados ETo del método del tanque de evaporación tomando como referencia al método estándar.

2.1. Generalidades

2.1.1. Antecedentes

Existen varios métodos indirectos de varios investigadores para determinar la evapotranspiración pero los que tuvieron mayor aplicación en el Perú, según Rosell, C. (1993) en los años 60, fueron Thornthwaite (Proyecto de irrigación de los valles de Chao, Virú, Moche y Chicama), Blaney y Criddle (en Agricultura) y J. E. Christiansen (Inventario, Evaluación y Uso de los Recursos Naturales de los diferentes valles) este último método con el apoyo de G.H. Hargreaves ha sido de mayor aplicación por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN). Estos investigadores y muchos otros, han desarrollado y trataron de estimar la evapotranspiración a lo largo de los años de acuerdo a sus condiciones climáticas y realidades geográficas, los cuales utilizaron algunos o varios parámetros meteorológicos para determinar la evaporación y la evapotranspiración, de los cuales el método indirecto de Hargreaves ha tenido mayor aceptación por los investigadores.

Desde la publicación de la Serie de Riego y Drenaje N° 24 de la FAO en 1977, la FAO ha buscado actualizar las metodologías para el cálculo de ETo acorde al avance de investigaciones y cálculos más precisos del uso del agua para los cultivos, siendo así que el método de Penman modificado de la FAO, sobrestimaba el valor de la ETo, mientras que los métodos de la radiación, de Blaney-Criddle y el método del tanque de evaporación Clase A recomendados también por la FAO, presentaban resultados variables en la evapotranspiración de referencia del pasto.

En mayo de 1990, la FAO organizó una reunión de expertos e investigadores, quienes en consenso recomendaron la aplicación del método combinado Penman-Monteith como nuevo procedimiento estándar para determinar la evapotranspiración de referencia (ETo) y establecieron el procedimiento para el cálculo de los distintos parámetros incluidos en el método.

El método estándar FAO Penman-Monteith fue publicado en el estudio FAO-56 en el año 1998 en versión inglés y posteriormente en el 2006 en su versión en español, en este documento se definió que la ETo se da en condiciones de un cultivo de referencia, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada, por lo tanto, en estas condiciones el nuevo método estándar de la FAO, obtiene resultados más consistentes y comparables. Este estudio describe a detalle los procedimientos y recomendaciones para usar el método estándar de FAO Penman-Monteith con información climática limitada o completa, descartando la necesidad de usar otros métodos para estimar la ETo y creando una base de referencia para la estandarización universal de la determinación de la ETo como requisito para determinar el agua del cultivo.

2.1.2. Descripción del problema

Para el presente trabajo, el autor, ha identificado dos aspectos importantes que han motivado su investigación y describe a continuación:

- En la actualidad, el tanque de evaporación clase A de Estados Unidos, es uno de los métodos de campo que cuenta con buena aceptación e implementación a nivel mundial y que ha permitido determinar la tasa de evaporación (Epan) de manera sencilla cuando se instalan en estaciones convencionales o en una EMA, pero en la revisión mensual se ha observado que existe información pérdida (60% a 70% mensual) y deficiencias en el registro debido principalmente a la falta de mantenimientos y supervisión para mantener los niveles de agua en el tanque dentro de los rangos de operación recomendados por la OMM y FAO, observándose estos problemas generalmente en estaciones ubicadas en lugares remotos, tal como se muestra en las imágenes de la Figura 2.

Figura 2

Principales problemas observados en el método del Tanque de Evaporación Clase A



- El autor, de acuerdo a su investigación, como una alternativa de solución a la problemática mencionado anteriormente, ha evaluado la necesidad de utilizar el método estándar para determinación de la evapotranspiración (horario) según el estudio de la FAO-56 con las variables climáticas medidas por la propia EMA, considerando que existen una gran variedad de métodos empíricos y directos, de diferentes investigadores y autores de estudios aplicados a sus realidades y con sus respectivas conclusiones.

2.1.3. Objetivos

2.1.3.1. Objetivo general

Implementar el método estándar FAO Penman-Monteith en una estación meteorológica automática (EMA Shahuindo) para la determinación horaria de la evapotranspiración de referencia (ET_o) según la guía N°56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO (FAO-56).

2.1.3.2. Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos que se derivan del objetivo principal se han identificado los siguientes:

1. Realizar una descripción del área de ubicación y estudio de la EMA Shahuindo.
2. Describir la metodología de implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA, donde está considerado los requisitos legales, guías y criterios nacionales e internacionales para instalación de una EMA, descripción del método estándar de la ET_o horario según FAO-56 y los métodos opcionales, la instrumentación y softwares con características específicas que permitan registrar la ET_o horario, y el desarrollo e implementación del programa en lenguaje BASIC para determinar la ET_o según el método estándar FAO Penman-Monteith en los registros horarios de una EMA.
3. Realizar el análisis y comparación de resultados de las ET_o obtenidos con el método estándar de FAO Penman-Monteith y los métodos opcionales de Hargreaves y del tanque de evaporación Clase A, este último con valores ajustados propuesto por la FAO, de los parámetros medidos in situ por la estación EMA Shahuindo, para el periodo 2018 al 2022.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Términos y definiciones

Para este informe previamente describiremos las definiciones a utilizarse:

2.2.1.1. Estación meteorológica automática (EMA)

En concordancia a la OMM (1992), se define como un conjunto de instrumentos meteorológicos integrados a un sistema de registro, donde las observaciones se realizan y transmiten automáticamente.

2.2.1.2. Estándar

Es una norma o documentos, que establecen requisitos, condiciones, características y orientaciones que sirve de base para la evaluación o comparación de algún proceso y/o resultado.

2.2.1.3. Estandarización

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), lo define como el proceso de formular y aplicar reglas, para una actividad específica, en beneficio y cooperación de todos los involucrados.

2.2.1.4. Evaporación

Para Allen et al. (1998), la evaporación es un proceso físico, mediante el cual el agua, que se encuentra en estado líquido, cambia al estado gaseoso, requiriéndose aproximadamente 600 calorías por gramo de agua evaporada proporcionado esta energía por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire. La evaporación ocurre de varias superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada, siendo la radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura del aire algunos de los factores meteorológicos más importantes que influyen en la evaporación.

El vapor de agua se retira de una superficie evaporante debido a la diferencia entre la presión del vapor de agua en esa superficie y la de la atmósfera circundante. A medida que

ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente.

2.2.1.5. Evapotranspiración (ET)

Allen et al. (1998), indica que la evaporación y la transpiración suceden al mismo tiempo y no es sencillo diferenciar ambos procesos. La evaporación desde el suelo cultivado se debe a la radiación solar que llega a su superficie, además del agua disponible en la capa superior del suelo. La radiación solar disminuye durante el período de crecimiento y desarrollo del cultivo debido al dosel del cultivo que sombrea cada vez más la superficie del suelo.

2.2.1.6. Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Se define como la tasa de evapotranspiración que ocurre desde una superficie de referencia con un cultivo hipotético, definido por Allen, et al (1998).

El concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) es similar al de la evapotranspiración potencial (ETP) introducido por Thornthwaite (1948) y que en contexto se define a la ETP como la máxima evaporación de agua desde un suelo con vegetación óptima y sin limitaciones de agua, se consideró equivalente en algunos trabajos, pero se difiere en que la ET_o se aplica a un cultivo hipotético de referencia (Mckenney y Rosenberg, 1993). En los últimos años, la evapotranspiración del cultivo de referencia ha ido sustituyendo al de ETP.

En la Figura 3, se muestra los factores principales que influyen en la ET_o con datos horarios de una EMA, según la FAO-56 (2006).

Figura 3

Factores que influyen en la ET_o



2.2.1.7. Exactitud (de una medición)

Termino cualitativo que “Se refiere a la proximidad entre el valor o valores medidos y el valor verdadero de una medición. En términos cuantitativos, la exactitud se expresa en términos de incertidumbre” (OMM, 2021, p.17).

2.2.1.8. Incertidumbre

“Se refiere a la medida cuantitativa de la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando” (OMM, 2021, p.17).

2.2.1.9. Instrumento de medición

“Dispositivo que realiza mediciones, solo o con otros dispositivos adicionales o complementarios entre sí” (OMM, 2021, p.17).

2.2.1.10. Resolución

Se refiere a la mínima variación de la magnitud que el instrumento de medición puede llegar a medir y mostrar en pantalla antes de cambiar de rango. También “Se refiere al número de dígitos que un instrumento de medición posee” (OMM, 2021, p.18).

2.2.1.11. Sensor

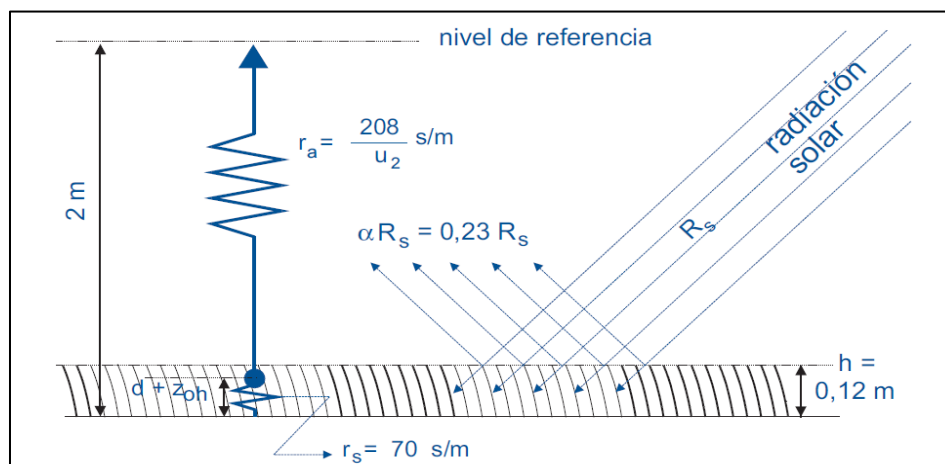
Se refiere al “Elemento de un sistema de medición que es capaz o sensible a un fenómeno, cuerpo o sustancia que posee una característica que puede ser medida” (OMM, 2021, p.16).

2.2.1.12. Superficie de referencia

De acuerdo a la Allen, et al (1998), es una superficie con un cultivo hipotético de referencia, creciendo sin déficit de agua, con una altura asumida de la vegetación de 0,12 m que cuenta con una resistencia superficial fija de 70 s/m durante todo el día y un albedo de 0,23. Es como una gran extensión de césped verde de altura uniforme, creciendo activamente y cubriendo completamente el suelo con vegetación corta y un riego adecuado.

Figura 4

Características de una superficie de referencia



Nota: Adaptado de características del cultivo hipotético de referencia de Estudio FAO-56, 2006, Evapotranspiración del cultivo - Guías para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo.

2.2.1.13. Transpiración

La transpiración “Consiste en la evaporación del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y su posterior integración a la atmósfera. Las plantas pierden agua principalmente a través de las estomas que permiten la entrega de gases y vapor de la planta a la atmósfera. Casi toda el agua absorbida por el suelo se pierde a través de la transpiración y solo una pequeña fracción forma parte del tejido vegetal” (FAO, 2006, p.3).

2.2.1.14. Variables climáticas

Se refiere a las lecturas o resultados de la medición de las magnitudes físicas o meteorológicas cuyos resultados proporcionan valores numéricos. Según OMM (2017, p.17), considera que, en meteorología, las lecturas o resultado de las medidas de los instrumentos representan variables que cuentan con una magnitud y unidad, como la presión atmosférica, la temperatura del aire, la velocidad del viento, etc.

La FAO (2006, p.5) indica que a las variables climáticas también se les denomina parámetros climáticos e identifica que los principales parámetros que influyen en la

evapotranspiración es la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa del aire y la velocidad del viento.

2.3. Descripción del área de estudio

2.3.1. Localización de la EMA Shahuindo

La EMA Shahuindo, se encuentra instalada y es de propiedad de la Unidad Minera Shahuindo (en adelante UM Shahuindo) de la empresa Shahuindo S.A.C. cuya operación se encuentra ubicada entre las altitudes de 2200 m.s.n.m. a 3500 m.s.n.m., en la cordillera occidental de los andes en la sierra de Cajamarca (Organismo de la Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2018a, p.33).

Tabla 1

Coordenadas de ubicación de la EMA Shahuindo.

Nombre de la EMA	Coordenadas UTM ⁽²⁾		Altitud (m.s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
Shahuindo	808616 ⁽¹⁾	9157489 ⁽¹⁾	2915

⁽¹⁾ Ubicación aprobada en el Instrumento Ambiental ITS-6 (2020).

⁽²⁾ Coordenadas en el sistema de Proyección Universal Transversal Mercator (UTM) Datum WGS-84 y zona 17M.

Políticamente, la EMA Shahuindo, se encuentra localizado en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba y departamento de Cajamarca, aproximadamente a 45 km al oeste del poblado de Cajabamba.

En el Anexo A, se presenta el mapa de ubicación de la EMA Shahuindo.

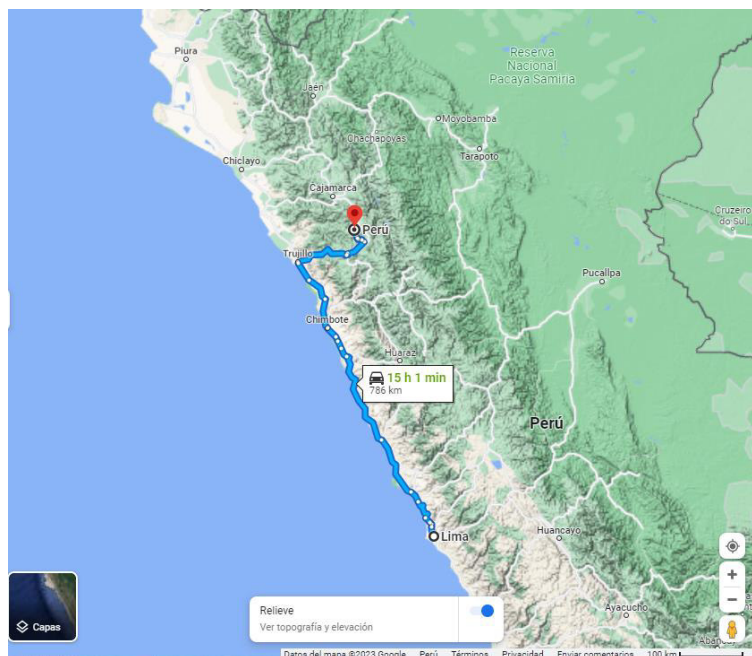
2.3.2. Vías de comunicación

La principal vía de comunicación para acceder a la UM Shahuindo desde la ciudad de Lima (véase Figura 5), se inicia el recorrido desde el centro de Lima hasta la ciudad Trujillo por la autopista Panamericana Norte, luego se toma la vía de Otuzco hasta la ciudad de Huamachuco, posteriormente se sigue una ruta afirmada hasta el poblado de Cajabamba y desde este punto se sigue la ruta hacia los caseríos de Pomabamba y finalmente Moyán Bajo, haciendo un recorrido aproximado de 786 Km y más de 15:00 horas de tránsito en vehículo automóvil,

donde se puede observar hermosos paisajes de la costa peruana, de la sierra liberteña y cajamarquina.

Figura 5

Vía de comunicación a la UM Shahuindo



Nota: Adaptado de búsqueda de ubicación de UM Shahuindo – Prov. Cajabamba, 2023, Google Maps.

2.3.3. Geología y geomorfología

La UM Shahuindo se ubica en el flanco oriental de la formación anticlinal Algamarca y geológicamente se encuentra sobre las formaciones Carhuaz, Farrat, Inca y Santa; las cuales se encuentran instruidas por andesitas antiguas del terciario inferior que se encuentran afectadas por procesos de plegamientos y fallamientos. Según su geomorfología presenta ocho unidades, agrupadas de acuerdo al origen de su geofoma como cumbres rocosas aisladas, colinas y lomadas, laderas con pendientes baja, media y fuerte, quebradas, terrazas y finalmente llanuras de inundación (Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles del Perú [SENACE], 2020).

2.3.4. Fisiografía

Es el resultado de una evolución larga originada por factores tectónicos y erosionales, que han modelado el paisaje hasta su estado actual y cuenta con tres grandes paisajes identificados como llanuras aluviales, colinas de arenisca calcárea, y montañas de arenisca calcárea, cuarcitas, calizas arenosas y lutitas grises. (SENACE, 2020)

2.3.5. Hidrografía

La zona de evaluación se localiza en la cuenca del río Condebamba, que es un afluente del río Crisnejas en su margen derecha. La cuenca del río Crisnejas tiene una extensión de unos 4909 km² y es un afluente del río Marañón por la margen izquierda. El río Marañón se encuentra en la cuenca hidrográfica del Amazonas que desemboca en el Atlántico. (OEFA, 2018b)

2.3.6. Medio social

Según SENACE (2020, p.16), las catorce localidades que forman parte del área de influencia social directa (AISD) de la UM Shahuindo, están distribuidos en los Centros Poblados de Algamarca, Chuquibamba y Araqueda que pertenecen a la jurisdicción del distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba y departamento de Cajamarca.

2.3.6.1. Demografía

La población en el AISD, ascienden a 6200 habitantes, de los cuales, 700 pobladores se ubican en el centro poblado de Algamarca y el resto de la población están distribuidos en localidades rurales. Según la distribución de la población por grupos etarios, la mayor proporción de personas tienen menos de 14 años de edad, el segundo grupo, entre 15 y 25 años, el tercer grupo entre los 26 y 44 años y el cuarto son mayores de 44 años. Los principales motivos de migración, son la búsqueda de una mejor educación y mejor empleo en las ciudades de Cajamarca, Trujillo y Lima. (SENACE, 2020)

2.3.6.2. Educación

En el AISD, se ubican 25 Instituciones Educativas (IE), que enseñan al menos uno de los tres niveles de educación básica regular. Cada una de las 14 localidades tiene al menos una institución educativa en su área. En seis caseríos del AISD, aproximadamente el 50% de la población es analfabeta, con mayor prevalencia en mujeres. (SENACE, 2020)

2.3.6.3. Salud

En el AISD existen dos puestos de salud Araqueda y Algamarca. La principal causa de morbilidad son las infecciones respiratorias agudas, asimismo, el 40.5% de los menores de 11 años presentan alguna infección aguda en las vías respiratorias, y de este grupo etario el 17% de habitantes sufren de desnutrición. (SENACE, 2020)

2.3.6.4. Empleo y actividades económicas

En el AISD, las principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería. La población también realiza otras actividades como el comercio minorista local y actividades relacionadas con la minería, como en el CP de Algamarca, donde el 19% se dedica a la minería. En agricultura, la población cultiva maíz, papa, verduras y frutas para consumo o venta local y en ganadería se dedican a la crianza de vacunos, ovinos, equinos y porcinos para la alimentación familiar y venta en menor medida. En relación a la minería, la compañía Shahuindo S.A.C. contrata temporalmente a pobladores de los caseríos de San José, Moyán Bajo, Moyán Alto, Shahuindo de Araqueda, Liclipampa Alto, La Fila, La Pauquilla, Araqueda y Algamarca. (SENACE, 2020)

2.3.6.5. Vivienda e infraestructura social

El principal material usado en la construcción de las casas en el AISD es el adobe,

aunque también se utiliza ladrillo en menor medida. En cuanto al abastecimiento del agua, mayormente las viviendas cuentan con suministro a través de la red pública fuera de sus hogares, un 25% de viviendas cuenta con conexión interna de la red pública y un porcentaje utiliza pozos, ríos y canales. La mayoría de las localidades no tienen electricidad, excepto en el CP Araqueda. (SENACE, 2020)

2.3.7. Zonas de vida

De acuerdo al informe de SENACE (2020), en el entorno de UM Shahuindo, se presentan tres zonas de vida; el bosque seco-montano Bajo Tropical (bs-MBT), el bosque seco-Premontano Tropical (bs-PT) y el bosque húmedo-Montano Tropical (bh-MT); información basada de la Guía Explicativa del Mapa Ecológico del Perú de la ONERN de 1976.

2.3.8. Clima y meteorología

De acuerdo a la evaluación climática de los registros de la estación Cajabamba (Latitud 07°37' Longitud 78°03' y Altitud 2783 m.s.n.m.) que se encuentra instalado con más de 14 años en el poblado de Cajabamba a cargo del SENAMHI, la caracterización climática para el distrito de Cajabamba, corresponde a una zona de vida B1 r B' la', que indica que la zona es ligeramente húmedo y semi frío, con pequeñas diferencias de agua durante el año y una concentración térmica de verano más baja (MINAG, 1978).

En la Tabla 2, se realiza un resumen de los comportamientos de los parámetros meteorológicos procesados y analizados por el autor de la EMA Shahuindo, donde se presenta los valores mínimo y máximo horarios mensuales, y los promedios mensuales de cada parámetro para el periodo de evaluación de enero 2018 a diciembre del 2022.

Tabla 2

Resumen mensual de parámetros meteorológicos periodo 2018 al 2022, EMA Shahuindo.

Temperatura Ambiental													
TA (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	7,4	7,1	6,4	8,7	7,2	6,8	6,9	6,4	7,1	6,7	6,6	6,5	6,4
Promedio	15,1	15,1	14,5	15,0	15,5	15,2	15,1	15,6	15,3	14,8	14,8	14,4	15,0
Máximo_horario	26,7	26,5	25,5	24,5	25,5	25,3	25,7	26,7	26,5	27,1	27,7	27,7	27,7
Humedad Relativa													
HR (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	22,0	16,1	25,6	29,2	15,2	17,5	14,2	14,4	6,4	16,2	8,1	9,1	6,4
Promedio	72,3	75,2	80,3	75,2	69,8	61,0	57,8	53,7	58,6	66,9	67,5	74,5	67,7
Máximo_horario	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Radiación Neta													
Rn (Watts/m ²)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	-160,4	-81,9	-66,2	-78,6	-77,2	-84,2	-91,5	-91,0	-332,3	-229,9	-98,6	-245,0	-332,3
Promedio	133,9	138,8	131,3	132,4	126,6	118,2	108,9	117,0	122,2	130,2	130,4	127,6	126,5
Máximo_horario	1210,0	1240,0	1278,0	1249,0	1128,0	1012,0	968,0	950,0	1176,0	1282,0	1210,0	1319,0	1319,0
Presión Barométrica													
PB (hPa)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	713,9	715,3	715,5	716,5	716,9	717,0	716,8	716,2	694,5	694,1	692,3	693,1	692,3
Promedio	720,1	720,3	720,6	721,0	721,2	721,2	721,2	721,3	716,6	716,2	715,7	715,6	719,2
Máximo_horario	726,2	724,7	725,3	725,0	725,4	725,8	725,3	726,4	726,2	725,3	724,1	724,3	726,4
Velocidad del viento a 10 m de altura													
UZ (m/s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Promedio	2,0	1,8	1,7	1,8	1,8	2,0	2,3	2,4	2,6	2,1	2,0	1,9	2,0
Máximo_horario	17,4	20,0	17,7	15,5	16,1	14,4	13,4	15,9	17,2	20,2	19,8	16,9	20,2
Dirección del viento													
WD (°)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Promedio Vect.	30,9	43,4	34,9	17,0	11,1	3,2	356,2	359,2	0,5	34,7	56,6	38,8	21,6
Máximo_horario	359,6	359,6	358,8	359,0	359,0	359,7	359,3	358,7	359,2	359,7	359,0	359,9	359,9
Precipitación													
Pp (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Promedio	128,9	144,9	198,9	93,4	43,4	17,1	12,0	12,8	38,4	104,9	98,2	154,5	87,3
Máximo_horario	24,5	22,3	24,7	20,9	18,5	9,6	4,6	6,3	22,2	21,0	17,2	24,8	24,8
Evapotranspiración con el Tanque Clase A													
ET _{o_ epan} (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultado
Mínimo_Horario	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Promedio	65,6	53,0	49,9	58,6	66,7	69,8	73,4	74,1	81,7	72,7	70,6	60,2	66,3
Máximo_horario	1,3	1,2	1,2	1,4	1,4	0,4	0,5	0,5	0,8	0,9	0,7	0,8	1,4

2.3.8.1. Temperatura ambiental

La temperatura ambiental promedio en la estación meteorológica EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación fue de 15,0 ° C. De la Tabla 2, los valores horarios de temperatura del aire fluctúan entre 6,4°C y 27,7°C.

En la Tabla 3, se presenta el promedio anual, promedios máximos y mínimos mensuales de la temperatura del aire correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA

Shahuindo. Los promedios mensuales de la temperatura del aire variaron entre 12,4°C y 16,1°C.

Tabla 3

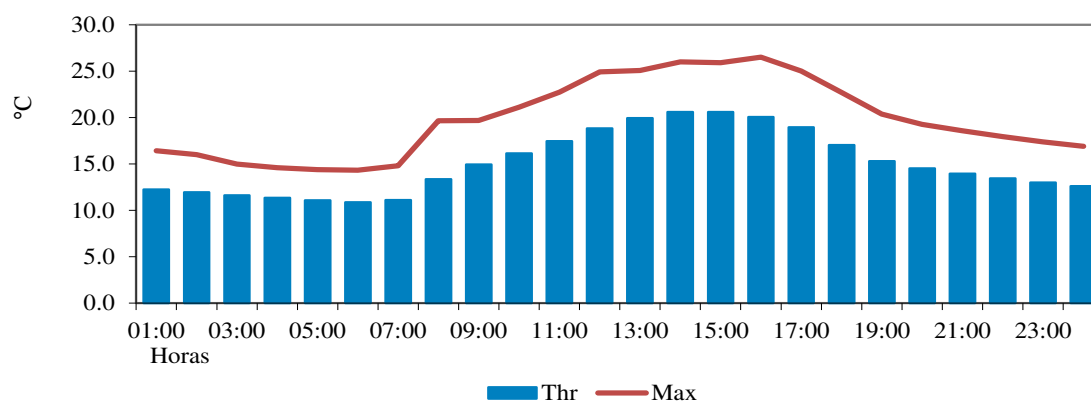
Temperatura ambiental promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

Años	Promedios de Temperatura Ambiental (°C)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	15,1	14,6	16,1
2019	15,3	14,3	15,9
2020	15,3	14,2	15,8
2021	15,5	13,8	16,1
2022	14,0	12,4	15,3
<i>Promedio Anual</i>	<i>15,0</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	<i>---</i>	<i>12,4</i>	<i>---</i>
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	<i>---</i>	<i>---</i>	<i>16,1</i>

La Figura 6, muestra la variación horaria multianual de la temperatura del aire correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los promedios horarios máximos de temperatura se alcanzan en promedio entre las 13:00 horas y 15:00 horas del día. Asimismo, de la Tabla 2, los valores mínimos horarios se presentan entre las 06:00 horas y 07:00 horas del día y principalmente en los meses de julio y agosto debido a la época seca.

Figura 6

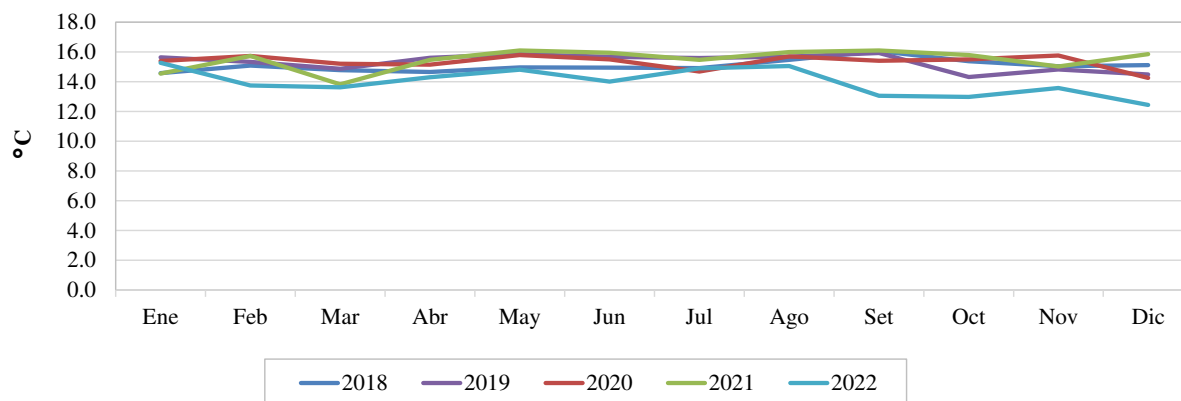
Comportamiento horario de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo



La Figura 7, muestra la variación de los promedios mensuales de la temperatura del aire correspondiente al periodo 2018 - 2022. Las temperaturas promedio mínimas del mes se presentan entre los meses octubre a marzo. Los máximos valores de temperatura se presentan entre mayo a setiembre.

Figura 7

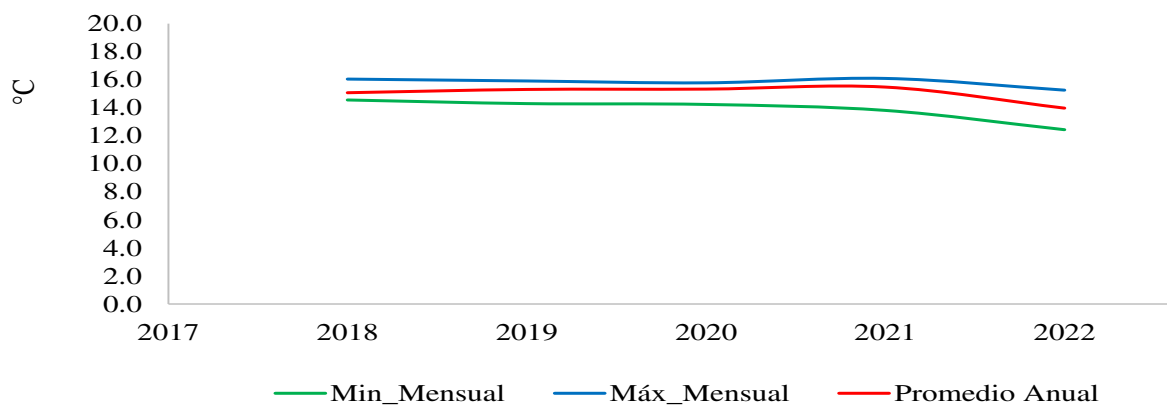
Comportamiento mensual de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo



En la Figura 8, se presenta el comportamiento anual de la temperatura del aire correspondiente al periodo 2018 - 2022.

Figura 8

Comportamiento anual de la temperatura ambiental – EMA Shahuindo



En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

2.3.8.2. Humedad relativa ambiental

La humedad relativa ambiental promedio en la estación meteorológica EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación es de 67,7%. De la Tabla 2, los valores horarios de humedad relativa fluctúan entre 6,4% en época seca a 100% en épocas de lluvias.

En la Tabla 4, se presenta el promedio anual, promedios máximos y mínimos mensuales de la humedad relativa correspondiente al periodo 2018 al 2022. Los promedios mensuales de

la humedad relativa variaron entre 49,5% y 84,1%.

Tabla 4

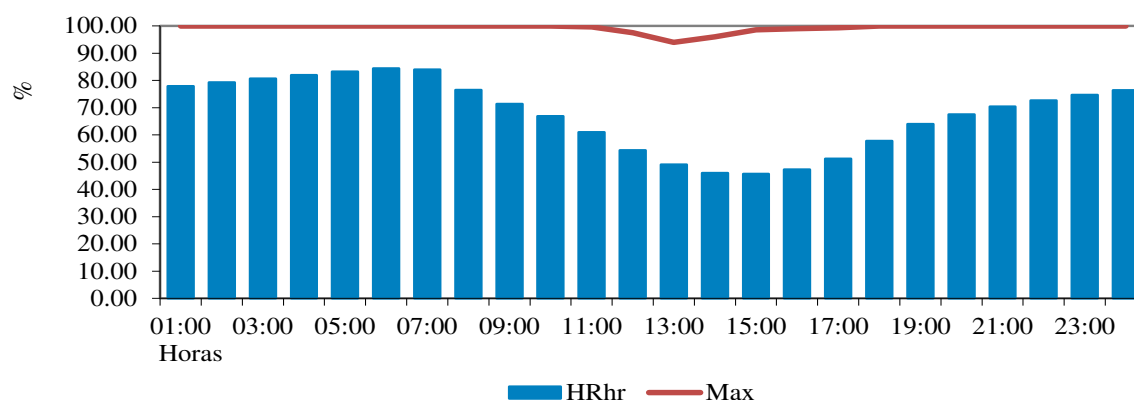
Humedad relativa promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

Años	Promedios de Humedad Relativa (%)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	66,0	51,6	79,5
2019	68,0	49,5	82,1
2020	66,4	51,8	79,0
2021	70,2	56,8	81,7
2022	68,1	54,8	84,1
<i>Promedio Anual</i>	67,7	---	---
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	---	49,5	---
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	---	---	84,1

La Figura 9, muestra la variación horaria multianual de la humedad relativa correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los promedios horarios máximos de humedad relativa, se alcanzan en promedio entre las 05:00 horas y 07:00 horas del día, el cual presenta un comportamiento inverso a la temperatura del aire. Asimismo, los valores mínimos horarios se presentan entre las 14:00 horas y 16:00 horas del día y principalmente en los meses de julio y agosto debido a la época seca en la zona de evaluación.

Figura 9

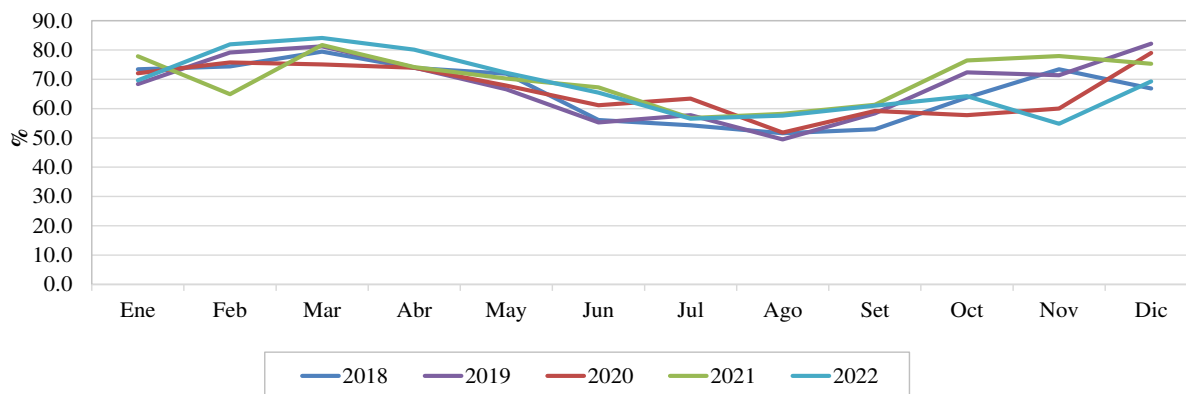
Comportamiento horario de la humedad relativa – EMA Shahuindo



La Figura 10 presenta la variación de los promedios mensuales de la humedad relativa correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los promedios mínimos mensuales se presentan entre los meses de julio a setiembre debido a la época seca o de estiaje y los máximos valores promedio entre los meses de diciembre a marzo debido a la época de precipitaciones.

Figura 10

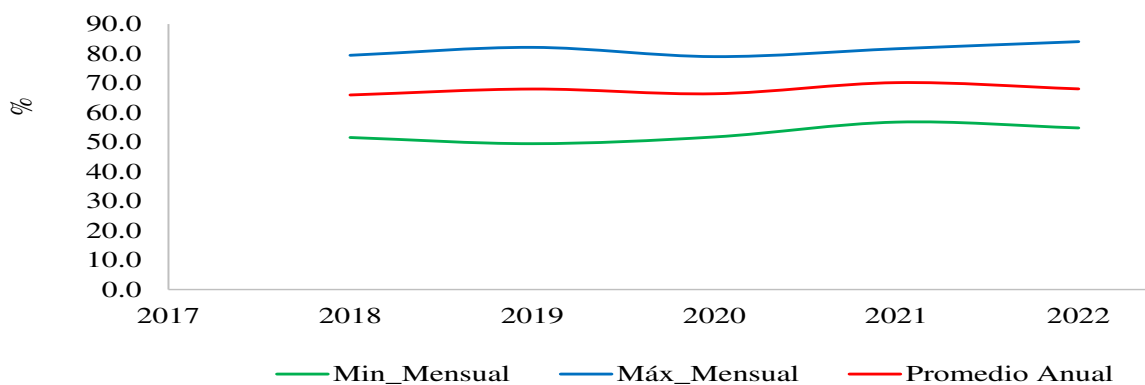
Comportamiento mensual de la humedad relativa – EMA Shahuindo



En la Figura 11, se muestra el comportamiento anual de la humedad relativa correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se ha observado el máximo valor promedio anual en el año 2021. En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

Figura 11

Comportamiento anual de la humedad relativa – EMA Shahuindo



2.3.8.3. Radiación neta

La radiación neta (R_n) promedio en la estación meteorológica EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación fue de $126,5 \text{ W/m}^2$.

En la Tabla 5, se presenta el promedio anual, promedios máximos y mínimos mensuales de la radiación neta correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo.

Los promedios mensuales de la radiación neta varían entre $92,0 \text{ W/m}^2$ y $154,5 \text{ W/m}^2$.

Tabla 5

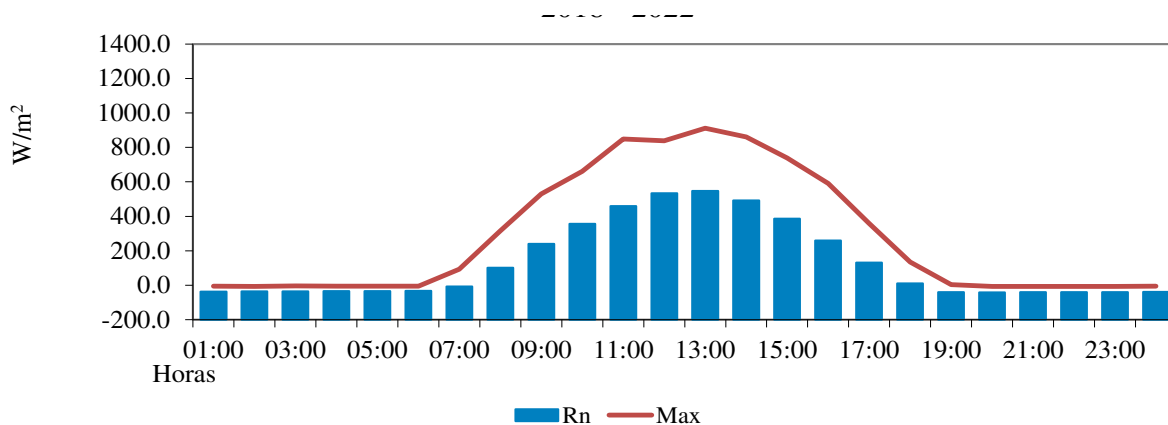
Radiación neta promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

Años	Promedios de Radiación Neta (W/m^2)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	130,5	108,0	154,5
2019	116,9	92,0	130,6
2020	128,2	117,8	138,9
2021	128,6	105,1	150,1
2022	128,1	113,5	141,8
<i>Promedio Anual</i>	<i>126,5</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	<i>---</i>	<i>92,0</i>	<i>---</i>
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	<i>---</i>	<i>---</i>	<i>154,5</i>

La Figura 12, muestra la variación horaria multianual de la radiación neta promedio correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los promedios horarios máximos de radiación neta, se alcanzan en promedio entre las 12:00 horas y 13:00 horas del día, debido a la mayor intensidad de radiación solar que ocurre en el día. Asimismo, los valores mínimos horarios se presentan entre las 18:00 horas y 06:00 horas del día debido a la predominancia de la irradiación en onda larga de la superficie terrestre.

Figura 12

Comportamiento horario de la radiación neta – EMA Shahuindo

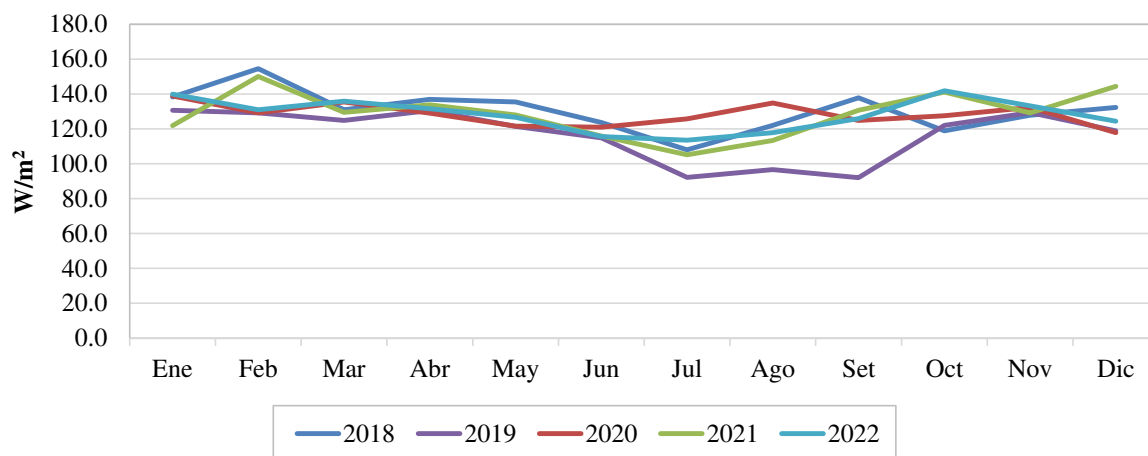


La Figura 13, presenta la variación de los promedios mensuales de la radiación neta correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los promedios mínimos mensuales de radiación neta, se presentan entre los meses de julio a setiembre y los máximos valores promedio entre los meses de diciembre a marzo debido a la disminución de los valores de radiación en onda larga que emite la superficie por la presencia de cielos con nubosidad, siendo de mayor

predominancia los valores de radiación solar en onda corta que logran atravesar la nubosidad.

Figura 13

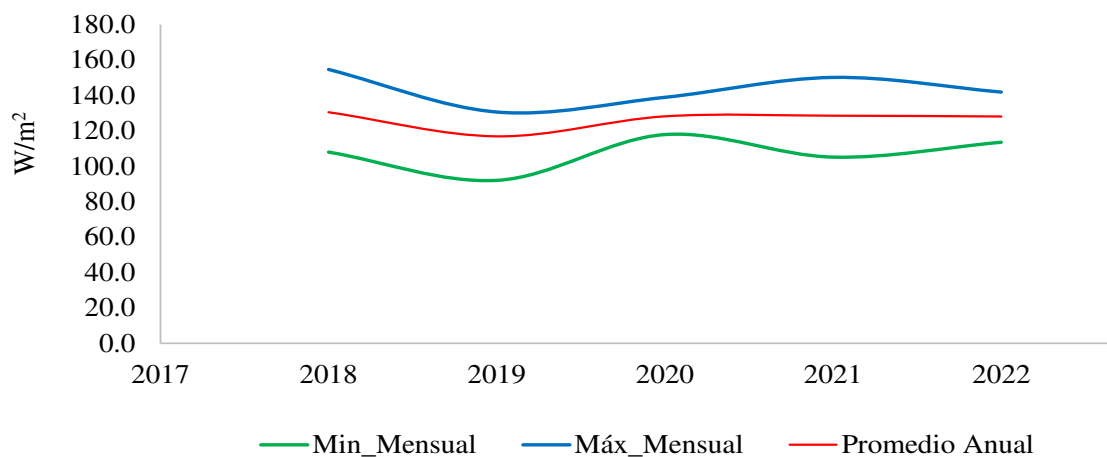
Comportamiento mensual de la radiación neta – EMA Shahuindo



En la Figura 14 se muestra el comportamiento anual de la radiación neta correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se ha observado los máximos valores promedio anual se alcanzaron en los años 2018 y 2021.

Figura 14

Comportamiento anual de la radiación neta – EMA Shahuindo



En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

2.3.8.4. Presión atmosférica

La presión atmosférica (P) promedio en la estación meteorológica EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación fue de 719,2 hPa.

En la Tabla 6, se presenta el promedio anual, promedios máximos y mínimos mensuales de la presión atmosférica correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo.

Tabla 6

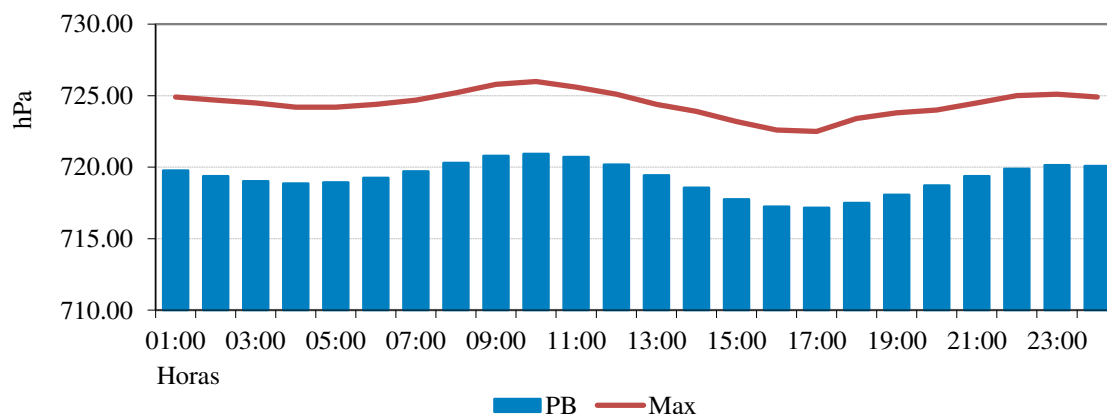
Presión atmosférica promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

Años	Promedios de Presión Atmosférica (hPa)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	720,1	719,1	721,0
2019	720,8	720,1	721,9
2020	721,2	719,9	722,3
2021	721,0	719,6	722,0
2022	713,1	697,3	720,9
<i>Promedio Anual</i>	719,2	---	---
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	---	697,3	---
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	---	---	722,3

La Figura 15, muestra la variación horaria multianual de presión atmosférica promedio correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los promedios horarios máximos de presión atmosférica, se alcanzan en promedio entre las 09:00 horas y 11:00 horas del día. Asimismo, los valores mínimos horarios se presentan entre las 16:00 horas y 17:00 horas del día.

Figura 15

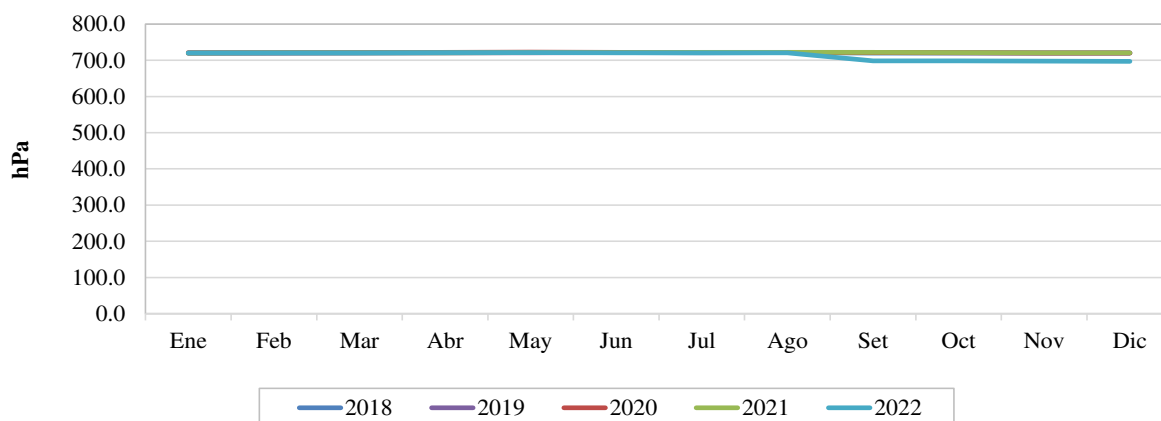
Comportamiento horario de la presión atmosférica – EMA Shahuindo



La Figura 16, muestra la variación de los promedios mensuales de la presión atmosférica correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los promedios mínimos mensuales de presión atmosférica, se presentan entre los meses de octubre a marzo y los máximos valores promedio entre los meses de mayo a setiembre.

Figura 16

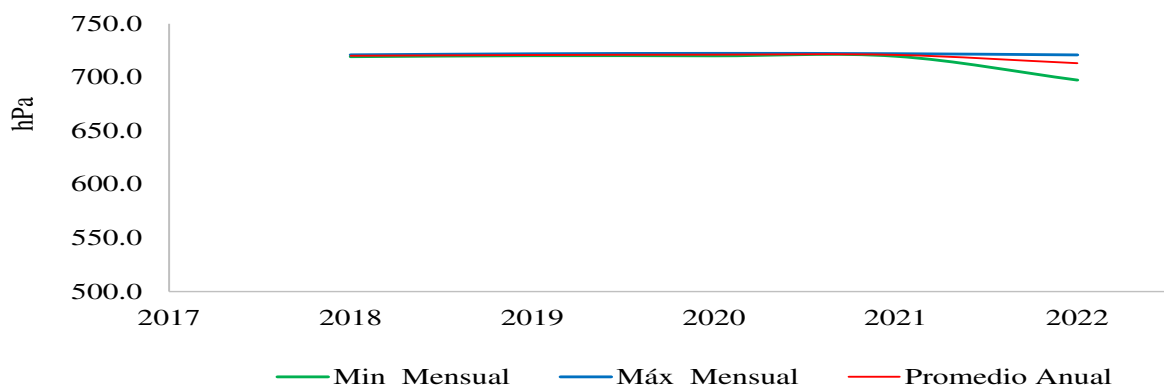
Comportamiento mensual de la presión atmosférica – EMA Shahuindo



En la Figura 17, se presenta el comportamiento anual de la presión atmosférica correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se ha determinado que los máximos valores se alcanzaron en el año 2020.

Figura 17

Comportamiento anual de la presión atmosférica – EMA Shahuindo



En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

2.3.8.5. Velocidad del viento

La velocidad del viento (uz) promedio medido a 10 m de altura en la EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación fue de 2,0 m/s. De la Tabla 2, los valores horarios de velocidad del viento fluctúan anualmente entre 0,0 m/s a 20,2 m/s.

En la Tabla 7, se presenta el promedio anual, promedios máximos y mínimos mensuales de la velocidad del viento correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo. Los valores promedios mensuales de la velocidad del viento estuvieron entre 1,4 m/s a 3,3 m/s.

Tabla 7

Velocidad del viento promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

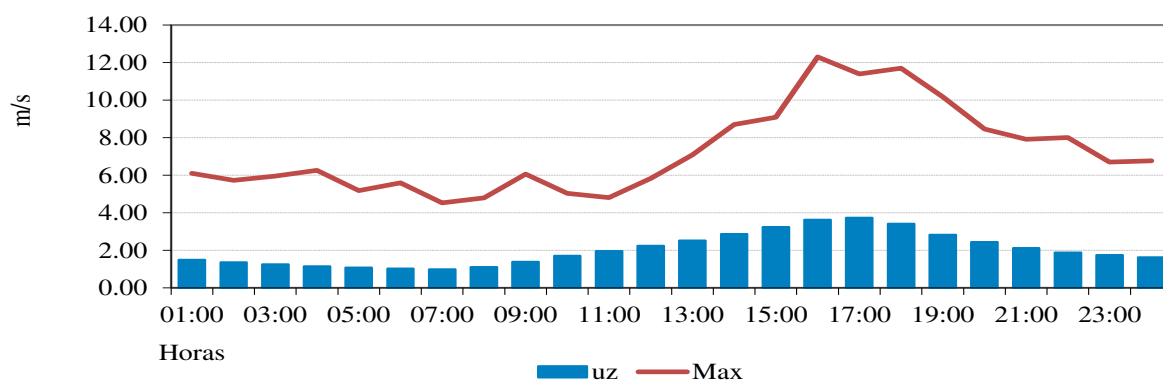
Años	Promedios de Velocidad del viento (m/s)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	2,3	1,6	3,0
2019	2,0	1,5	2,7
2020	2,0	1,5	2,4
2021	1,8	1,4	2,2
2022	2,1	1,4	3,3
<i>Promedio Anual</i>	2,0	---	---
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	---	1,4	---
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	---	---	3,3

La Figura 18, muestra la variación horaria multianual de la velocidad del viento

promedio correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los valores promedios horarios máximos de velocidad de viento, se alcanzan en promedio entre las 16:00 horas y 17:00 horas del día. Asimismo, los valores mínimos horarios se presentan entre las 05:00 horas y 07:00 horas del día debido a la calma ambiental por velocidades de viento inferiores a 0,3 m/s.

Figura 18

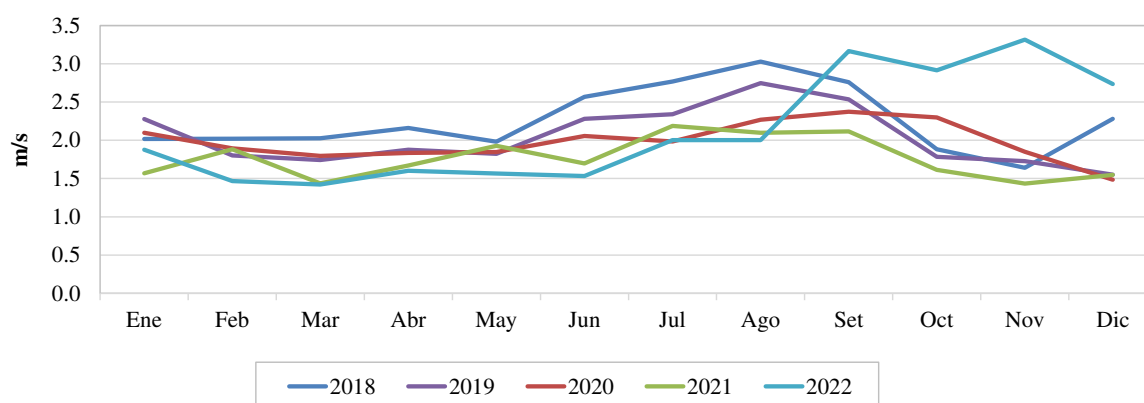
Comportamiento horario de la velocidad del viento – EMA Shahuindo



La Figura 19, muestra la variación de los promedios mensuales de la velocidad del viento correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los promedios mínimos mensuales de velocidad del viento, se presentan entre los meses de diciembre a mayo y los máximos valores promedio entre los meses de julio a setiembre debido a la mayor intensidad de la radiación solar y temperatura del aire que influyen en movimiento y turbulencia de las masas de aire.

Figura 19

Comportamiento mensual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo

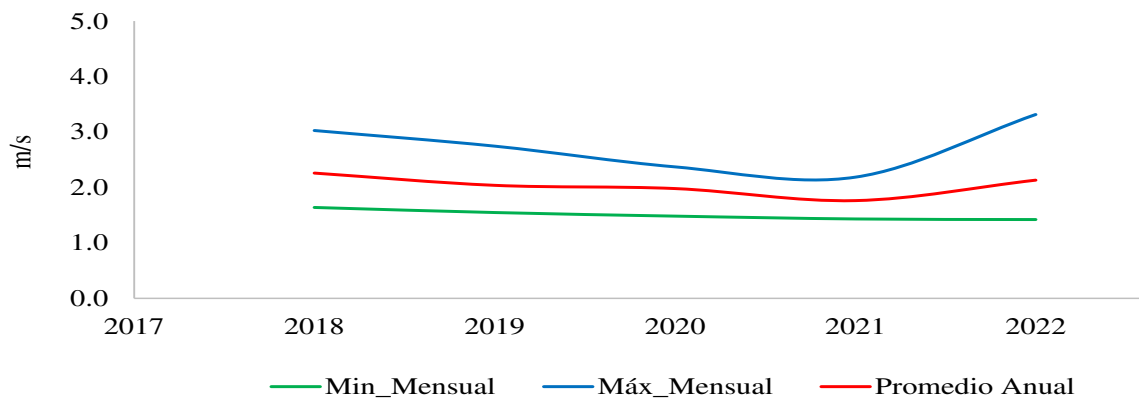


En la Figura 20, se muestra el comportamiento anual de la velocidad del viento

correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se observa que los máximos valores se alcanzaron en los años 2018 y 2022.

Figura 20

Comportamiento anual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo

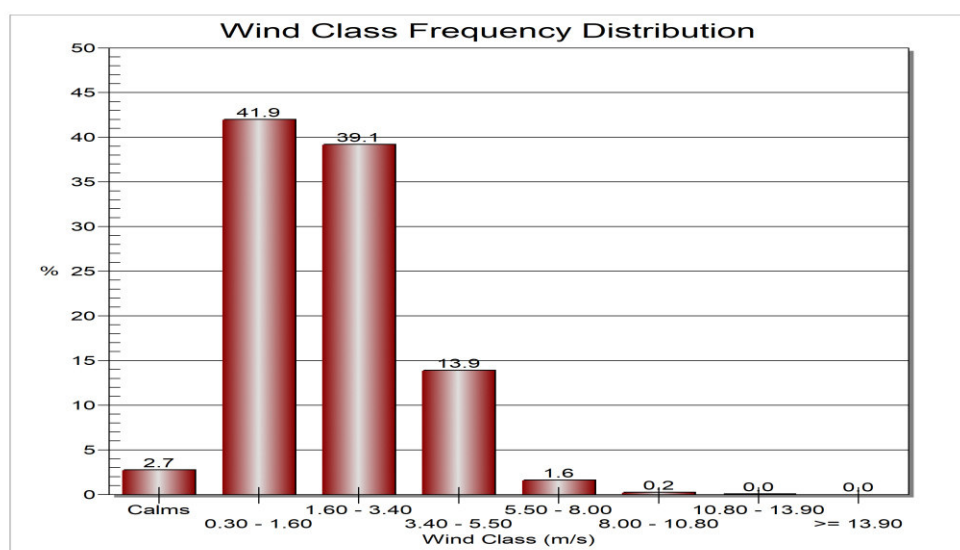


En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

En la Figura 21 se presenta la distribución de la frecuencia del viento correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se observa que el rango de mayor predominante es de 0,3 m/s a 1.6 m/s denominadas ventolinas en un 41,9% del registro evaluado.

Figura 21

Distribución porcentual de la velocidad del viento – EMA Shahuindo



Nota: Gráfico generado con uso de software WRPLOT View de Lakes Environmental.

En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

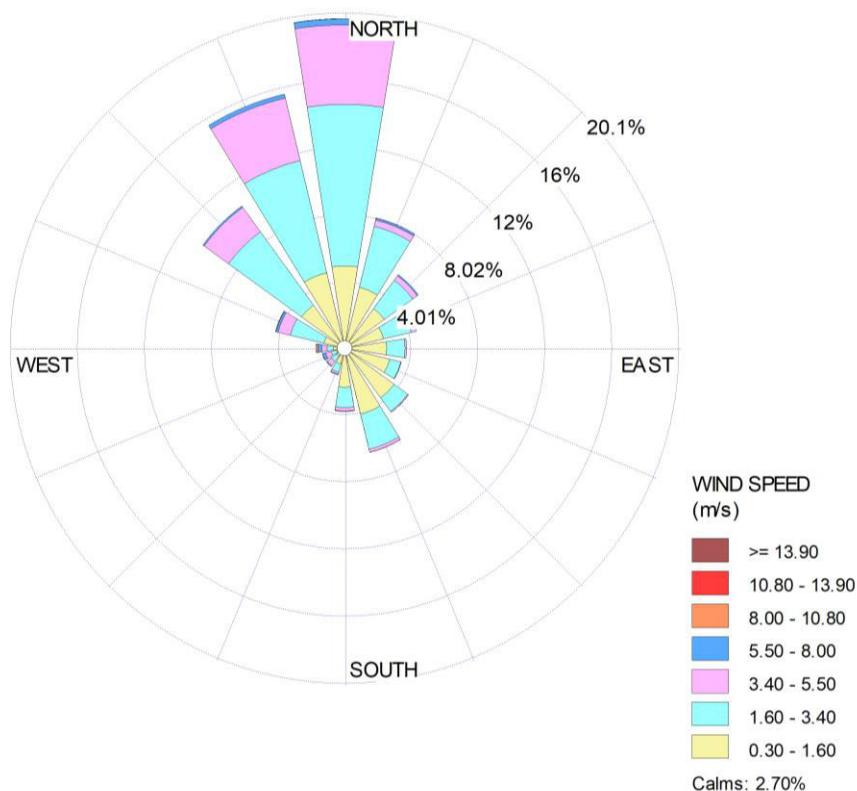
2.3.8.6. Dirección del viento

La dirección del viento predominante (de donde proviene) en la ubicación de la EMA Shahuindo, obtenido del periodo de evaluación fue del norte (N) con 19,7% de presencia del registro evaluado, con vientos entre 1,6 m/s a 3,4 m/s, considerados como brisas muy débiles según la escala de Beaufort.

En la Figura 22, se presenta la rosa de vientos predominante registrado por la EMA Shahuindo durante el periodo de años 2018 a 2022.

Figura 22

Rosa de viento predominante – EMA Shahuindo



Nota: Gráfico generado con uso del software WRPLOT View de Lakes Environmental.

En la Tabla 8, se presenta el promedio vectorial anual, promedios máximos y mínimos

mensuales de la dirección del viento correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo. Los valores promedios vectoriales mensuales de la dirección del viento variaron entre $1,1^\circ$ y $357,6^\circ$.

Tabla 8

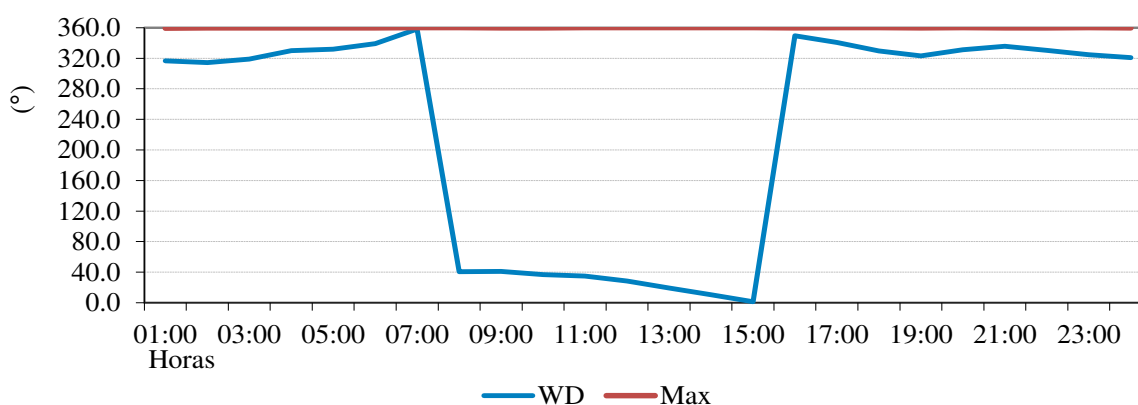
Dirección del viento promedio - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

Años	Promedio Vectorial de Dirección del viento ($^\circ$)		
	Anual	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	10,3	3,6	357,3
2019	11,7	10,6	355,1
2020	20,7	1,1	72,8
2021	33,8	6,9	357,6
2022	31,6	3,3	86,2
<i>Promedio Anual</i>	21,6	---	---
<i>Mínimo Promedio Mensual</i>	---	1,1	---
<i>Máximo Promedio Mensual</i>	---	---	357,6

La Figura 23, muestra la variación horaria multianual de la dirección del viento promedio correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que entre las 16:00 horas y 07:00 horas del día el viento proviene entre el noroeste (NW) y norte (N). Asimismo, entre las 08:00 horas y 15:00 horas del día el viento proviene entre norte (N) y noreste (NE).

Figura 23

Comportamiento horario de la dirección del viento – EMA Shahuindo

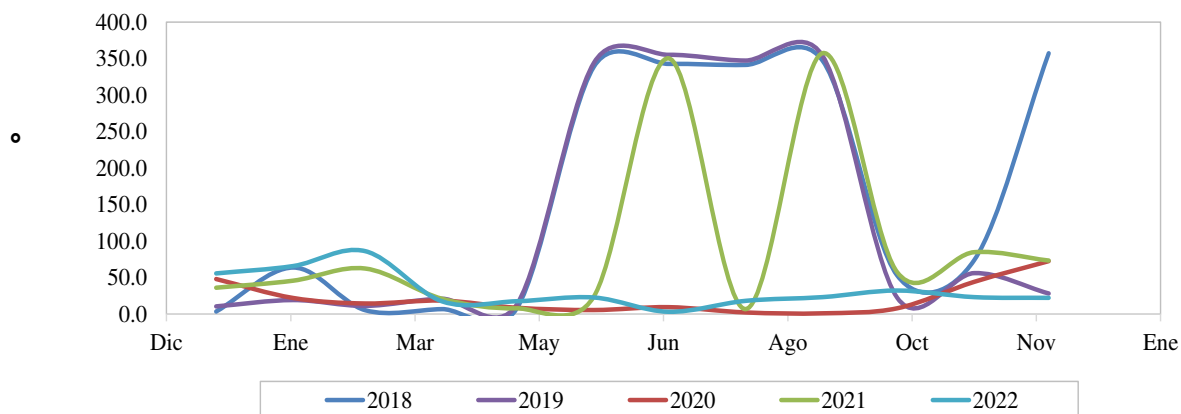


La Figura 24, muestra la variación de los promedios vectoriales mensuales de la dirección del viento correspondiente al periodo 2018 - 2022. Entre los meses de octubre a mayo la dirección del viento es mayormente del norte (N) y noreste (NE) y entre los meses de mayo

a setiembre los vientos varían entre el noroeste (NW) y norte (N).

Figura 24

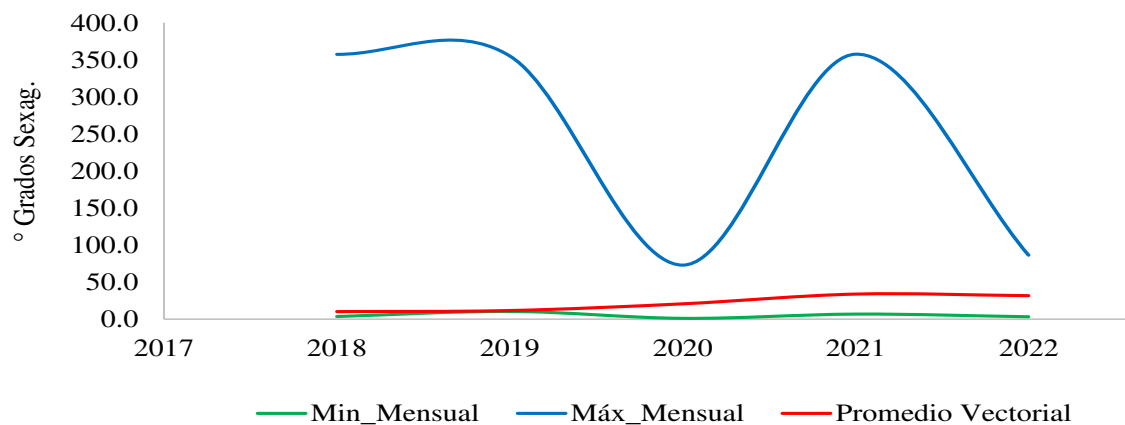
Comportamiento mensual de la dirección del viento – EMA Shahuindo



En la Figura 25, se muestra el comportamiento anual de la dirección del viento correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se observa que los vientos mayormente provienen del norte (N) de acuerdo al promedio vectorial anual.

Figura 25

Comportamiento anual de la dirección del viento – EMA Shahuindo



En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

2.3.8.7. Precipitación

La precipitación acumulada en la EMA Shahuindo varió anualmente entre 800,9 mm y 1456,1 mm, obteniéndose un promedio anual de 1047,3 mm del periodo de evaluación.

De la Tabla 2, los valores horarios de precipitación fluctuaron anualmente entre 0,0 mm en meses de estiaje a 24,8 mm en los meses de lluvia.

En la Tabla 9, se presenta los acumulados anuales, promedio anual, máximos y mínimos mensuales de precipitación correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo. Los valores mensuales de la precipitación variaron entre 0,0 mm (época de estiaje) y 237,6 mm (época de lluvias).

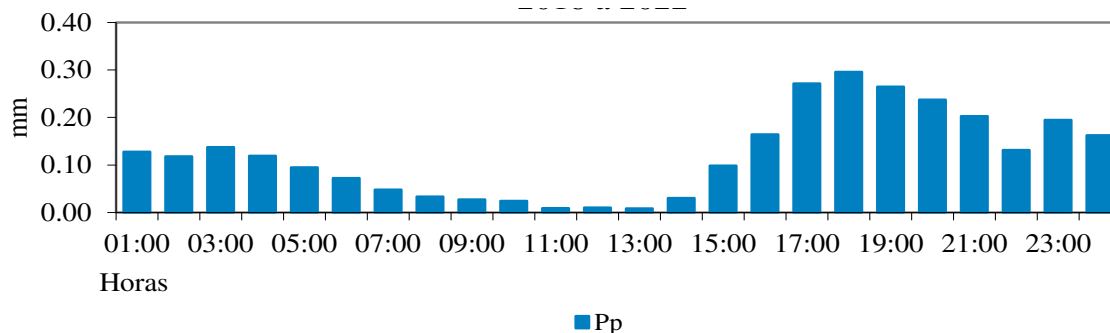
Tabla 9

Precipitación acumulada - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

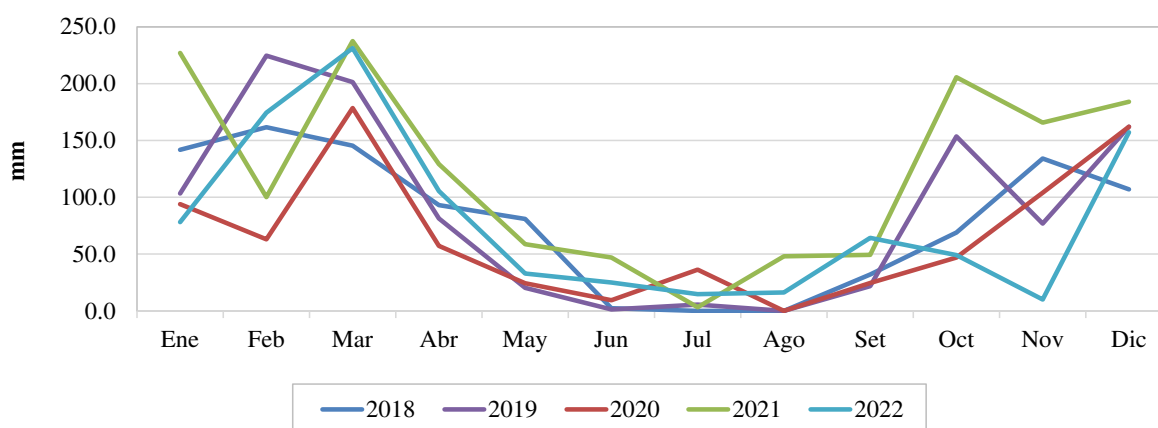
Años	Precipitación acumulada (mm)		
	Total	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	967,9	0,0	161,8
2019	1052,7	0,0	224,8
2020	800,9	0,0	178,6
2021	1456,1	3,3	237,6
2022	959,0	10,0	231,3
<i>Promedio Anual</i>	1047,3	---	---
<i>Mínimo Mensual</i>	---	0,0	---
<i>Máximo Mensual</i>	---	---	237,6

En el Anexo B, se presenta el registro mensual con los valores promedio, máximos y mínimos correspondiente al periodo 2018 - 2022.

La Figura 26, muestra la variación horaria multianual de la precipitación correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los valores horarios máximos de la precipitación, se distribuyeron entre las 17:00 horas y 19:00 horas del día. Asimismo, los valores mínimos horarios se presentan entre las 11:00 horas y 13:00 horas del día.

Figura 26*Comportamiento horario de la precipitación – EMA Shahuindo*

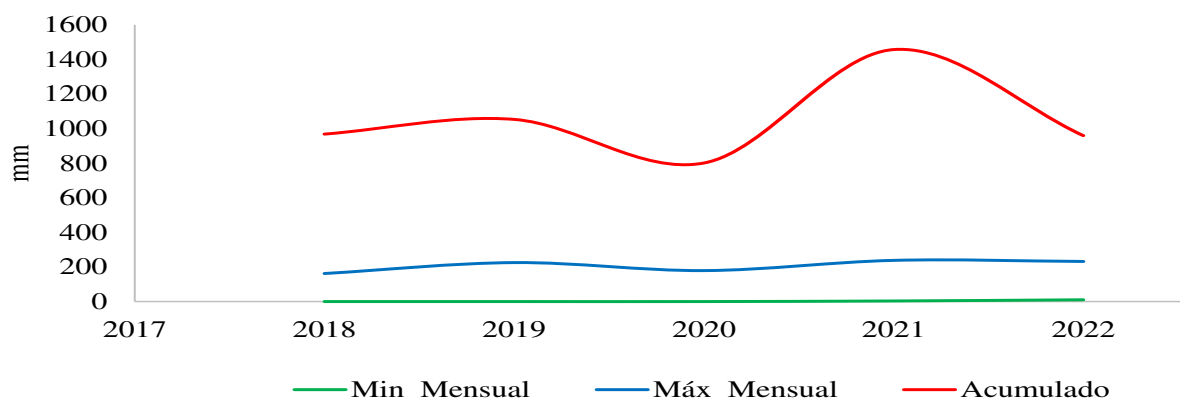
La Figura 27, se presenta la variación de los acumulados mensuales de la precipitación pluvial correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los acumulados mínimos mensuales de precipitación, se presentan entre los meses de junio a agosto y los máximos valores acumulados se registran entre los meses de octubre a marzo correspondiente a la época de lluvias en la zona de estudio.

Figura 27*Comportamiento mensual de la precipitación – EMA Shahuindo*

En la Figura 28, se presenta el comportamiento anual de la precipitación correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se observa que los máximos valores acumulados se alcanzaron en los años 2019 y 2021.

Figura 28

Comportamiento anual de la precipitación – EMA Shahuindo



2.3.8.8. Evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia (ET_o_Epan) acumulada en la EMA Shahuindo varió anualmente entre 696,3 mm y 873,3 mm, obteniéndose un promedio anual de 796,2 mm del periodo de evaluación. El coeficiente del tanque (K_p) promedio para ajustar los registros de la evaporación del tanque evaporímetro Clase A (Epan), fue de 0,72.

En la Tabla 10, se presenta los acumulados anuales, promedio anual, máximos y mínimos mensuales de precipitación correspondiente al periodo 2018 al 2022 registrado en la EMA Shahuindo. Los valores mensuales de la ET_o_Epan variaron entre 36,1 mm (época de lluvias) y 100,9 mm (época seca).

Tabla 10

Evapotranspiración acumulada - años 2018-2022, EMA Shahuindo.

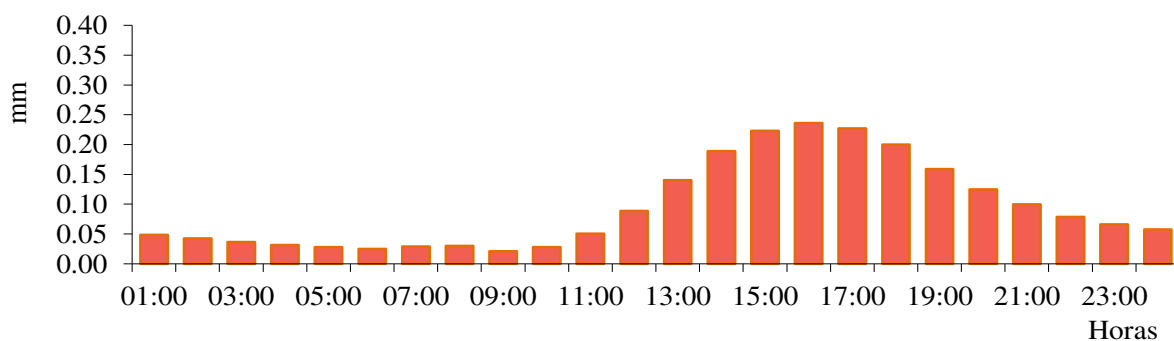
Años	Evapotranspiración acumulada (mm)		
	Total	Mínimo Mensual	Máximo Mensual
2018	786,3	48,2	88,8
2019	696,3	36,1	75,0
2020	841,8	48,4	86,0
2021	783,1	42,4	81,4
2022	873,3	43,6	100,9
<i>Promedio Anual</i>	796,2	---	---
<i>Mínimo Mensual</i>	---	36,1	---
<i>Máximo Mensual</i>	---	---	100,9

En la Figura 29 se muestra la variación horaria multianual de la ET_o_Epan horaria

correspondiente al periodo 2018 – 2022, donde se la observa que los valores promedio horarios máximos de ETo_Epan, se distribuyeron entre las 15:00 horas y 17:00 horas del día. Asimismo, los valores mínimos horarios acumulados se presentaron entre las 03:00 horas y 09:00 horas del día.

Figura 29

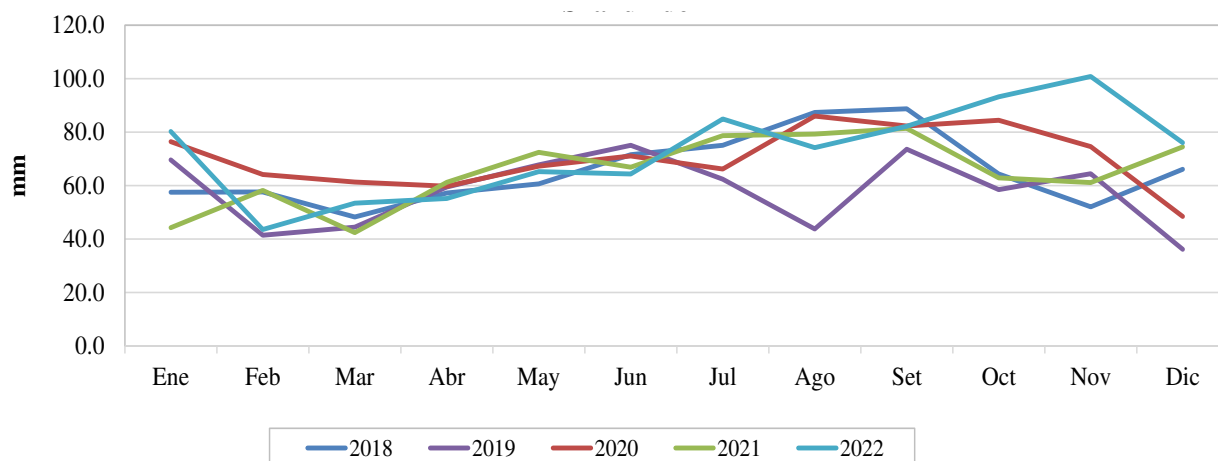
Comportamiento horario de la evapotranspiración de referencia – EMA Shahuindo



En la Figura 30, se presenta la variación de los acumulados mensuales de la ETo_Epan correspondiente al periodo 2018 - 2022. Los acumulados mínimos mensuales se presentan en los meses de lluvia de noviembre a marzo y los máximos acumulados se registran entre los meses de julio a octubre correspondiente a la época seca en la zona de evaluación.

Figura 30

Comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia – EMA Shahuindo

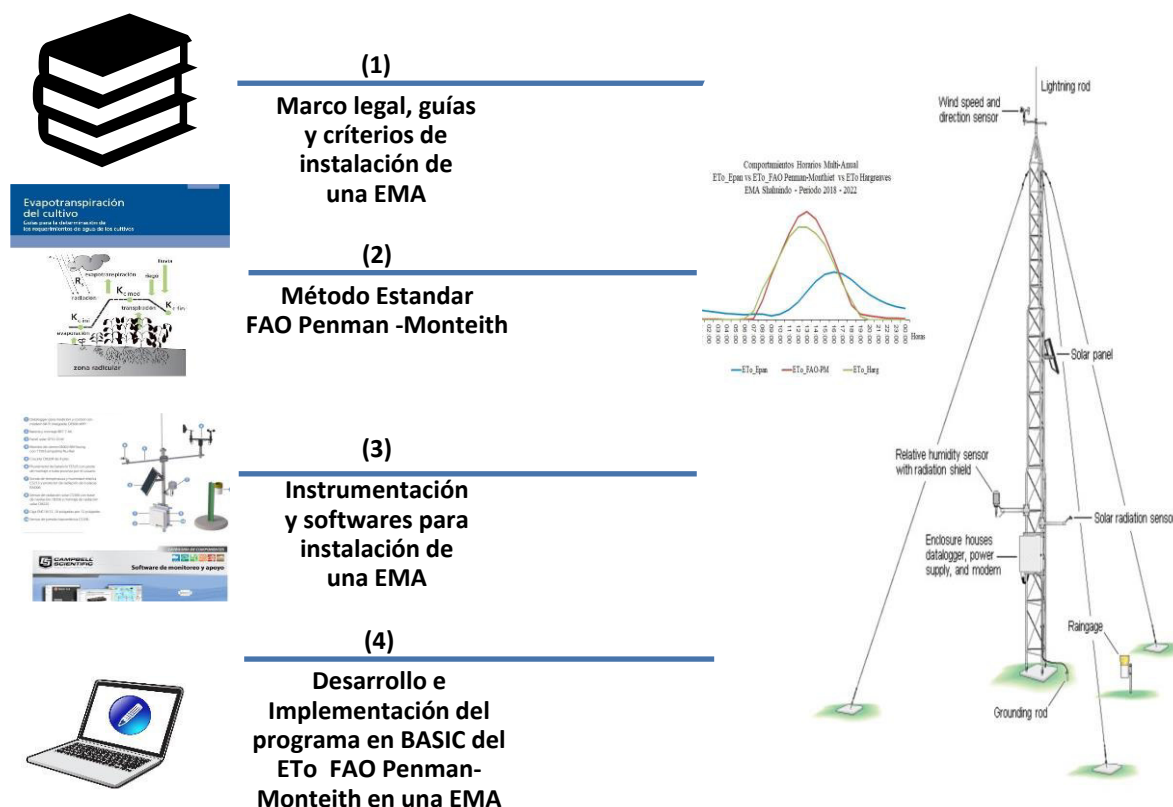


2.4. Metodología para implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA

La metodología para cumplir con el objetivo general del presente trabajo, se muestra en la Figura 31 y está basado en la integración de cuatro procesos, como son en primer lugar los requisitos legales, guías y criterios para instalación de una EMA, en segundo lugar el método estándar de la ETo a nivel horario según FAO, como tercer aspecto es la instrumentación y softwares, y el cuarto esta referido al desarrollo e implementación del programa en lenguaje Basic para determinar la ETo según el método estándar FAO Penman-Monteith en los registros horarios de una EMA:

Figura 31

Metodología de implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA



A continuación, en las siguientes secciones se va a desarrollar cada uno de estos aspectos considerados en la metodología de implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA:

2.4.1. Base legal y guías para instalación de estaciones meteorológicas automáticas

El marco legal nacional y guías internacionales sobre el cual se sustenta los criterios técnicos de instalación, revisión y funcionamiento de una EMA, son las siguientes:

- Ley N° 24031. Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, Modificado por la Ley N° 27188.
- Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.
- Resolución Presidencial Ejecutiva N° 0174 SENAMHI-PREJ-OGOT/2013. Protocolo para la Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas, Agrometeorológicas e Hidrológicas del SENAMHI, publicado el 10 de Setiembre 2013.
- Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos N° 8 (OMM N°8) de la Organización Meteorológica Mundial, edición 2014 y actualizado en el 2017.
- Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos N° 8. Volumen I – Medición de Variables Meteorológicas (OMM N°8 – Vol. I) de la Organización Meteorológica Mundial, edición 2021.
- Manual de Garantía de la Calidad para Sistemas de Medición de la Contaminación del Aire. Volumen IV: Mediciones Meteorológicas Versión 2.0 (Final), EPA-454/B-08-002 - Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA) del 13 de marzo 2008.

2.4.1.1. Criterios técnicos para instalación de una EMA

La instalación de los sensores meteorológicos de la EMA debe cumplir con las últimas versiones de las guías y recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (en adelante guía OMM N°8), la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (en adelante guía US EPA) y el protocolo nacional de SENAMHI.

Las EMA deben colocarse en sitios que representen las condiciones atmosféricas del área que se requiere evaluar, asimismo, se deben evitar lugares con obstáculos cerca de la estación que puedan interferir con las mediciones de las variables. (SENAMHI, 2013)

Es muy importante definir las coordenadas de ubicación en el sistema Universal Transversal Mercator (UTM), el datum geodésico en WGS-84 para Perú y su altitud en m.s.n.m.

El emplazamiento de instalación y distribución de los componentes para una EMA, debe realizarse en un área nivelada de 10 metros por 15 metros (estaciones climatológicas principales) y excepcionalmente hasta 6 metros por 6 metros (estaciones climatológicas con propósitos específicos), contar con su respectivo cerco perimétrico, sistema de pararrayos para las tormentas eléctricas, sistema de comunicación remota y seguridad. (SENAMHI, 2013)

El área debe contar con acceso libre, seguridad permanente y estar fuera del radio de 50 metros de caminos transitados de manera general.

En la Tabla 11, se presentan los principales criterios técnicos que se consideran en las guías y recomendaciones de la OMM N°08, US EPA y protocolo nacional SENAMHI para la instalación de los sensores meteorológicos de la EMA.

Tabla 11

Resumen de criterios de instalación de una EMA.

Sensor	Criterio	Recomendación
Velocidad y dirección del viento (Anemómetro-veleta)	Distancia al obstáculo más cercano y altura de instalación.	<ul style="list-style-type: none"> • La altura estándar de instalación es de 10 m (OMM, US EPA) (Véase Figuras 32 y 33). • La distancia entre el sensor y cualquier obstáculo cercano, debe ser al menos diez veces la altura del obstáculo más cercano. • No estará a sotavento según la dirección predominante del viento de estructuras u obstáculos cercanos, en cumplimiento al criterio del protocolo nacional de SENAMHI.
Temperatura y Humedad Relativa (termohigrómetro)		<ul style="list-style-type: none"> • La altura de instalación será entre 1,25 a 2 metros de altura. (1.6 m según protocolo nacional SENAMHI) • La distancia del obstáculo más cercano será por lo menos 4 veces la altura del obstáculo. • No tendrá exposición directa al sol y estará libre de sombras o en proximidad de árboles, edificios u otros objetos que obstruyan la ventilación natural. • Debe contar con su protector solar de diseño de fábrica. • El sensor debe alejarse por lo menos 30 metros de áreas pavimentadas, fuentes de calor y superficies de aguas.
Precipitación Pluvial (Pluviómetro)		<ul style="list-style-type: none"> • Se debe ubicar la boca del pluviómetro entre 1,2 a 1,5 m del suelo. (SENAMHI, 2013) • La distancia a considerar entre el sensor y cualquier obstáculo se considera por lo menos 4 veces mayor a la altura del obstáculo (paredes, edificios, etc). • En lugares de donde exista nevadas, los pluviómetros deben contar con su sistema calefactor.
Sensor de presión atmosférica (Barómetro)		<ul style="list-style-type: none"> • La altura de instalación será entre 1,5 a 2 metros de altura, según protocolo nacional de SENAMHI y de preferencia instrumento digital (piezoeléctrico o resistivo) según recomendación de la guía OMM N°08.
Radiación neta (Piranómetro y pirgeómetro de onda corta y larga)		<ul style="list-style-type: none"> • El sensor de <i>radiación neta (Rn)</i> se instalará según los manuales de los fabricantes a 1,5 m de altura, para la medición correcta de la radiación infrarroja desde la superficie del suelo. • No se instalará cerca de paredes de color claro u otros objetos que puedan reflejar la luz solar y estar libre de obstáculos que puedan producir sombra en su superficie, según recomendación de la guía OMM N°08.

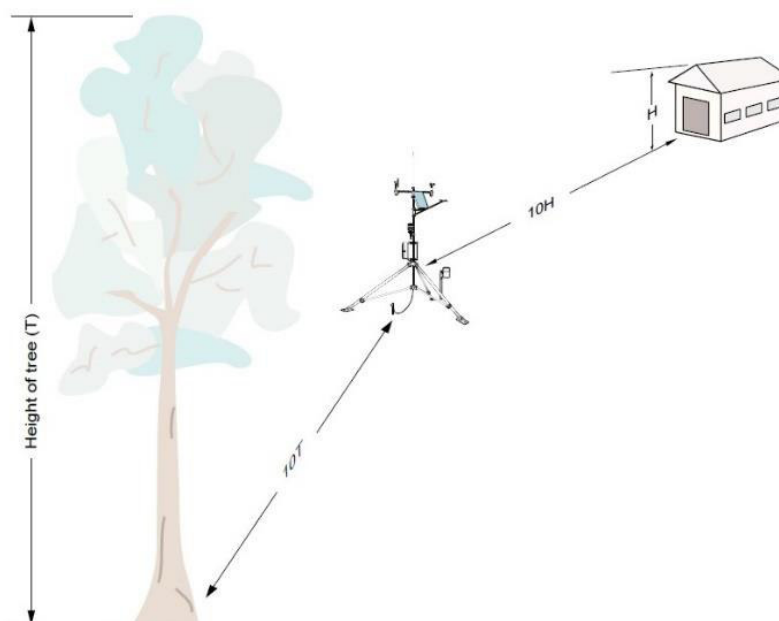
Sensor	Criterio	Recomendación
Evaporación con tanque Clase A del U.S. Weather Bureau.	Distancia al obstáculo más cercano y altura de instalación.	<ul style="list-style-type: none"> Se realizará la instalación del tanque de evaporación en una zona libre del área de la estación y sobre una plataforma de madera de 15 cm de altura del suelo. (FAO,2006, p.84) Se mantendrá en su operación los niveles entre 5 cm y 7,5 cm como niveles máximo y mínimo del agua desde el borde superior del tanque de evaporación, en cumplimiento a la metodología de medición y a los criterios de OMM N°08 y protocolo nacional SENAMHI. No se debe instalar cerca de paredes de color claro u otros objetos que puedan reflejar la luz solar y cerca de obstáculos que puedan producir sombra en su superficie.

Nota: Resumen de recomendaciones de Guías OMM N°08, US EPA y Protocolo Nacional elaborado por el autor.

Figura 32

Distancia recomendada de la EMA y el obstáculo cercano

Wind Speed and Direction



Nota: Imagen extraída del Volume IV: Meteorological Measurements, 2008, US EPA.

Figura 33

Vista de instalación de una EMA con torre de 10 metros

**2.4.1.2. Densidad de instalación de estaciones**

La densidad para instalación de EMAs, depende de la escala espacial y temporal de los fenómenos meteorológicos que se vayan a observar y que la OMM en la guía N°168 (OMM, 2020) ha tratado de dar un alcance al respecto. Esta guía presenta valores de densidad mínima con respecto a diversos tipos de estaciones climatológicas e hidrológicas, para zonas climáticas y geográficas diferentes (véase Tabla 12), sin embargo, de acuerdo a esta organización, estos valores están siendo evaluados a la fecha y sus resultados finales serán publicados en su sitio web en las actualizaciones de la respectiva guía.

Tabla 12

Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie en km² por estación) según OMM

<i>Unidad fisiográfica</i>	<i>Precipitación</i>		<i>Evaporación</i>
	<i>No registradoras</i>	<i>Registradoras</i>	
Costa	900	9000	50000
Montaña	250	2500	50000
Planicie interior	575	5750	5000
Montes/ ondulaciones	575	5750	50000
Islas pequeñas	25	250	50000
áreas urbanas	–	10 a 20	–
Polos/ tierras áridas	10000	100000	100000

Nota: Adaptado de densidad de estaciones según superficie, 2022, Tabla I.2.6. Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM N° 168), Vol. I: Hidrología - De la Medición a la Información Hidrológica.

Según la guía N°168, para las estaciones climatológicas que miden precipitación y evaporación, se deben incluir los parámetros de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad de viento, porque estos elementos meteorológicos afectan a la evaporación.

La fiabilidad de un sistema de pronóstico cualquiera, basado en comparaciones entre resultados de estaciones climatológicas, está vinculada a directamente a la densidad de la red instalada y apropiadamente mantenida, como también a la calidad del mismo modelo implementado de acuerdo a la OMM (2020).

2.4.2. Métodos para determinar la Evapotranspiración de referencia - ETo

A continuación, se va a describir el método estándar FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) a partir de información meteorológica horaria, para lo cual se va a requerir conocer la ecuación estándar y las variables requeridas que es el objetivo de este trabajo.

Cabe indicar que se describen también los métodos opcionales de Hargreaves y del tanque de evaporación Clase A recomendados para escenarios con información climática limitada según el estudio de la FAO-56, con la finalidad de realizar el análisis de la información

meteorológica procesada de la estación EMA Shahuindo y aplicar las recomendaciones de la FAO (2006), con respecto al uso de los resultados ETo de FAO Penman Monteith y determinar la ecuación de ajuste con la información obtenida con el método del tanque de evaporación Clase A.

2.4.2.1. Método estándar FAO Penman-Monteith

La ecuación estándar de la FAO Penman-Monteith utilizada para el **cálculo horario de la evapotranspiración de referencia (ETo)** de acuerdo al estudio FAO-56 (2006), se presenta a continuación:

$$E_{To_FAO - PM} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\left(\frac{37}{T_{hr} + 273} \right) u_2 (e^{\circ}(T_{hr}) - e_a) \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Ecuación 01})$$

Donde:

E_{To_FAO-PM} = evapotranspiración de referencia [mm. hora⁻¹]

R_n = radiación neta en la superficie de referencia [MJ.m⁻². hora⁻¹]

G = densidad del flujo del calor del suelo [MJ.m⁻². hora⁻¹]

T_{hr} = promedio horario de la temperatura del aire [°C]

Δ = pendiente de la curva de presión de saturación de vapor en T_{hr} [kPa°C⁻¹]

γ = constante psicrométrica [kPa. °C⁻¹]

e° = presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa]

e_a = presión real de vapor [kPa]

u_2 = promedio de la velocidad del viento a 2 metros del suelo [m.s⁻¹].

Cabe indicar que al aplicar la ecuación FAO Penman-Monteith para periodos de *tiempo horarios o menores*, la ecuación general ETo y algunos procedimientos se deben ajustar de acuerdo para periodos de tiempo menores como los registros a nivel de 05 minutos como mínimo (FAO, 2006). De otro lado indicar a nivel operacional de una EMA, que a menor sea el tiempo de los registros, los registradores de datos (datalogger), tendrán menos espacio de

almacenamiento.

Como parte de la estandarización, la FAO precisa que las constantes en la ecuación 01 del ETo, consideran una resistencia superficial constante (r_s) de 70 s.m^{-1} durante todo el día, porque al sumar los valores horarios obtenidos para los reportes diarios, los valores son compensados entre sí.

A continuación, definiremos los parámetros meteorológicos que intervienen de las EMA y las fórmulas derivadas de estas variables para determinar el valor de ETo a nivel horario según el método estándar de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006):

2.4.2.1.1. Radiación neta (R_n)

La radiación neta, R_n , es resultado del equilibrio de energías que la superficie terrestre absorbe, refleja y emite, debido a la diferencia entre la radiación entrante de onda corta neta (R_{ns}) y la radiación saliente de onda larga neta (R_{nl}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

La R_n en promedio es positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor promedio diario de R_n es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas.

Este parámetro es importante que se mida en el lugar de instalación de la EMA, aunque en la metodología de la FAO-56, presenta cálculos que permiten obtener el valor de R_n estimada a partir de los registros de radiación solar con piranómetros utilizando la ecuación de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, para lo cual también se requiere las coordenadas de ubicación y otros datos adicionales de la EMA.

En los registros de la EMA Shahuindo, la R_n ha sido medido directamente con el sensor radiómetro neto modelo Q7.1 de la marca REBS.

Las unidades de los registros de radiación neta reportados por las estaciones

meteorológicas se deben expresar en W/m^2 o $W.m^{-2}$, pero en la ecuación estándar de ETo se requiere en unidades de $MJ.m^{-2}. hora^{-1}$, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación multiplicado por el factor de conversión para periodos horarios:

$$RN_{MJ} = Rn \times 0,0036 \quad (\text{Ecuación 02})$$

2.4.2.1.2. *Flujo de calor del suelo (G)*

Es la energía que se transmite del suelo, el cual, se deriva de la radiación neta y siempre es un valor pequeño que debe considerarse dentro del balance energético para estimar la evapotranspiración. Cuando el suelo se calienta los valores de G, son positivos y cuando el suelo se enfría son negativos.

El valor horario de G se puede aproximar durante periodos de luz por:

$$G = 0,1 Rn \quad (\text{Ecuación 03})$$

Y durante los periodos nocturnos:

$$G = 0,5 Rn \quad (\text{Ecuación 04})$$

2.4.2.1.3. *Constante psicrométrica (γ)*

La constante psicrométrica, es la relación entre el calor específico del aire húmedo a presión constante y el calor latente de vaporización (Brunt, 1952). Su ecuación esta dado por:

$$\gamma = \left[\frac{C_p \cdot P}{\epsilon \cdot \lambda} \right] \times 10^{-3} = [0,665 \times P] \times 10^{-3} \quad (\text{Ecuación 05})$$

Donde:

γ = constante psicrométrica [$Kpa. ^\circ C^{-1}$]

C_p = calor específico del aire = $1,013 [Kj. Kg^{-1}. ^\circ C^{-1}]$

P = promedio de la presión atmosférica [kPa]

ϵ = relación del peso molecular del vapor de agua / aire seco = $0,622$

λ = calor latente de vaporización $2,45 [MJ. Kg^{-1}]$

Considerando que en la ecuación ETo, las unidades de presión atmosférica se deben expresar en kilopascales (kPa), se ha usado el siguiente factor de conversión para convertir los

registros horarios de la EMA Shahuindo de hectopascales a kilopascales (1 hPa = 0,1 KPa) quedando la ecuación 05 de la siguiente manera para los cálculos respectivos:

$$\gamma = [0,665 \times P] \times 10^{-3} \times 0,1 \quad (\text{Ecuación 06})$$

El valor promedio de presión atmosférica en hectopascales (hPa) ha sido obtenido del sensor modelo PTB-110 de la marca Vaisala Oyj.

2.4.2.1.4. Velocidad del viento (u_2)

La velocidad del viento es una variable importante para el cálculo de la ETo y en un lugar dado varía con el tiempo, expresándose como el promedio sobre un intervalo determinado de tiempo y se mide en metros por segundo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ó m/s).

El viento disminuye cerca del suelo y se incrementa con la altura, por esa razón, los anemómetros se ubican a una altura estándar de 10 m en meteorología y 2 o 3 m en agrometeorología. Para ajustar los datos de velocidad del viento provenientes de instrumentos situados a diferentes alturas a la altura estándar de 2 m, se utiliza la siguiente relación logarítmica:

$$u_2 = u_z \left(\frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \right) \quad (\text{Ecuación 07})$$

u_2 = velocidad del viento a 2 m sobre la superficie ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

z = altura del anemómetro sobre la superficie (m)

u_z = velocidad del viento medida a Z m sobre la superficie ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Cabe mencionar que el valor de velocidad de viento en la EMA Shahuindo, es medida a 10 m de altura con el sensor dual de velocidad y dirección de viento modelo 05103-S de la marca R.M. Young Company, por lo tanto, se ha empleado la fórmula anterior para el ajuste de los valores a 2 m de altura.

2.4.2.1.5. Temperatura del aire (T_{hr})

Para el caso de ETo para periodos horarios o menores, se considerará el valor promedio

de la temperatura ambiental (Thr) en grados celsius ($^{\circ}C$), según FAO-56 (2006, p.75).

$$Thr = \text{temperatura promedio horario } [^{\circ}C]$$

Para periodos diarios o mensuales es recomendable utilizar la temperatura media (Tm) obtenida a partir de la información de las temperaturas máxima y mínima en grados Celsius ($^{\circ}C$) con la siguiente ecuación:

$$Tm = \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 08})$$

Tm = temperatura media [$^{\circ}C$],

T_{\max} = temperatura máxima del periodo de tiempo ($^{\circ}C$)

T_{\min} = temperatura mínima del periodo de tiempo ($^{\circ}C$)

Los valores de temperatura ambiental (Thr) han sido obtenidos del registro medido con un sensor 41382-VC de la marca R.M. Young Company.

2.4.2.1.6. Presión de saturación de vapor (e°)

Es la presión ejercida por un volumen de aire retenido y saturado sobre una superficie evaporante a una determinada temperatura y un determinado momento de equilibrio, $e^{\circ}(Thr)$.

La cantidad de moléculas de agua en el aire varía según la temperatura. A mayor temperatura del aire, mayor capacidad de retener vapor de agua y mayor presión de vapor saturado.

La ecuación usada se presenta de la siguiente manera (Tetens, 1930):

$$e^{\circ}(Thr) = 0,6108 \left(\exp \left[\frac{17,27 * Thr}{Thr + 237,3} \right] \right) \quad (\text{Ecuación 09})$$

$e^{\circ}(Thr)$ = presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [Kpa]

Thr = temperatura promedio del aire [$^{\circ}C$]

$\exp [..]$ = 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

2.4.2.1.7. Presión real de saturación (ea)

La presión real de vapor (ea) se usa para representar el contenido de agua (humedad)

del aire en el lugar de medición y se puede calcular a partir de varios datos como de la humedad, de temperatura de punto de rocío, de temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco, o los datos de humedad relativa y temperatura del aire. El valor de la presión real de vapor (ea), se expresa en kilopascales (kPa).

Para efectos del método estándar, en los cálculos horarios se debe contar con el promedio horario de la humedad relativa, y la ecuación del ea , esta dada por:

$$ea = e^{\circ}(\text{Thr}) \left(\frac{\text{HR}}{100} \right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

ea = presión real de vapor [Kpa]

$e^{\circ}(\text{Thr})$ = presión de saturación de vapor a la temperatura del aire promedio horario (Thr) [kPa] de ecuación 07.

HR = promedio horario de la humedad relativa [%]

En caso de no contar con el valor promedio horario de la humedad relativa, la ea puede ser derivado de los valores máximos y mínimos de la presión de saturación de vapor (e°), y de los valores máximos y mínimos de humedad relativa (%), según la siguiente ecuación:

$$ea = \left(\frac{e^{\circ}(\text{Tmin}) \frac{\text{HRmax}}{100} + e^{\circ}(\text{Tmax}) \frac{\text{HRmin}}{100}}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

ea = presión real de vapor [Kpa]

$e^{\circ}(\text{Tmin})$ = presión de saturación de vapor a la temperatura mínima del periodo de tiempo [Kpa]

$e^{\circ}(\text{Tmax})$ = presión de saturación de vapor a la temperatura máxima del periodo de tiempo [Kpa]

HRmin = humedad relativa mínima del periodo de tiempo [%]

HRmax = humedad relativa máxima del periodo de tiempo [%]

Los valores mínimos y máximos de temperatura ambiental y humedad relativa, han sido obtenidos del registro del sensor 41382-VC de la marca R.M. Young Company.

2.4.2.1.8. *Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)*

La ecuación para calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, está dada por:

$$\Delta = 4098 * \left[\frac{0,6108 \left(\exp \left[\frac{17,27 * Thr}{Thr + 237,3} \right] \right)}{(Thr + 237,3)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

Δ = pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [Kpa. °C⁻¹]

Thr = promedio horario de la temperatura del aire [°C]

exp [..] = 2.7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

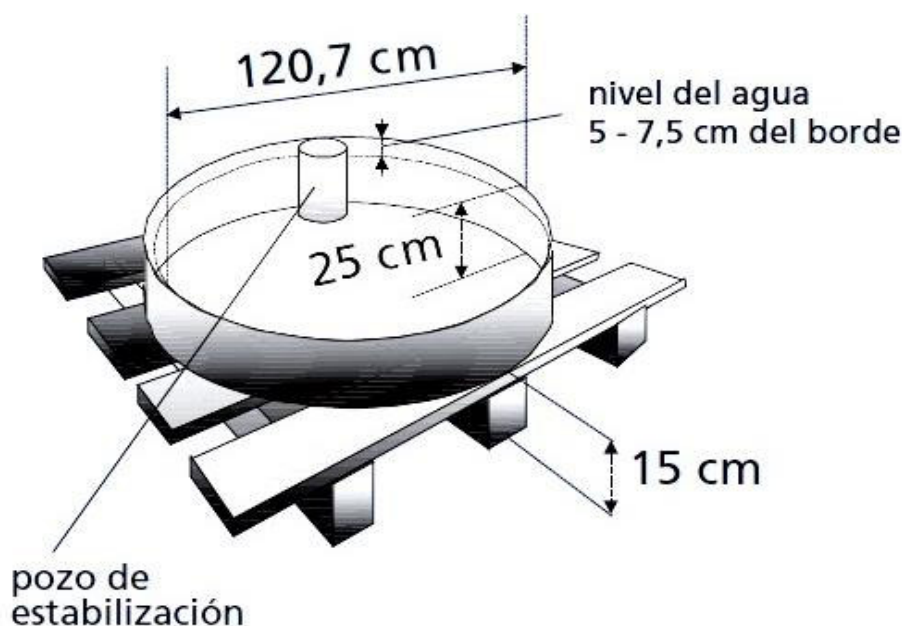
2.4.2.2. **Método del Tanque de evaporación Clase A**

El tanque de evaporación o tanque evaporímetro Clase A, es una forma de medir cómo la radiación, el viento, la temperatura y la humedad afectan la evaporación en una superficie de agua al aire libre. Sin embargo, aunque el tanque de evaporación y la transpiración del cultivo son afectados por los mismos factores climáticos, hay diferencias significativas en la pérdida de agua entre una superficie libre evaporante y una superficie cultivada (FAO, 2006, p.78).

El tanque de evaporación, como se presenta en la Figura 34, es un recipiente cilíndrico de acero inoxidable de 254 mm de altura y 120,65 cm de diámetro. Se instala sobre una base de madera tipo parihuela que tiene una altura de 15 cm. (FAO, 2006, p.84)

Figura 34

Tanque de evaporación Clase A según FAO-56



Los niveles de agua en el interior del tanque de evaporación para considerarse las lecturas para el reporte de la tasa de evaporación del tanque (epan), se deben mantener entre 5.0 cm y 7.5 cm desde el borde superior del tanque (OMM, 2017), es decir entre 204 mm a 179 mm como límites máximo y mínimo de la altura del agua respectivamente, con la finalidad de evitar reportes de tasas de evaporación por subestimación en exceso de agua o sobreestimación por lecturas con niveles bajos de agua en el tanque.

En la actualidad el tanque de evaporación, como se muestra en la Figura 35, se instala con un sensor electrónico conectado a un registrador de datos para obtener las lecturas horarias o también para realizar la lectura convencional todos los días entre las 07:00 horas y 08:00 horas, también se pueden implementar con un sistema de suministro de agua automático ideal para zonas costeras y que permiten mantener las lecturas dentro del rango de operación recomendado por la OMM (2021).

Figura 35

Tanque de evaporación Clase A con sensor electrónico



Nota: Vista de revisión por el autor del sensor y tanque de evaporación, 2018, Informes de servicios de Mantenimiento.

Los registros de evaporación del tanque (E_{pan}) está relacionada a la E_{To} por un coeficiente empírico (K_p) derivado de la ubicación del tanque de evaporación, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$E_{To_E_{pan}} = K_p \times E_{pan} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

$E_{To_E_{pan}}$ = evapotranspiración de referencia [mm. hora^{-1} o mm. día^{-1}]

K_p = coeficiente del tanque de evaporación

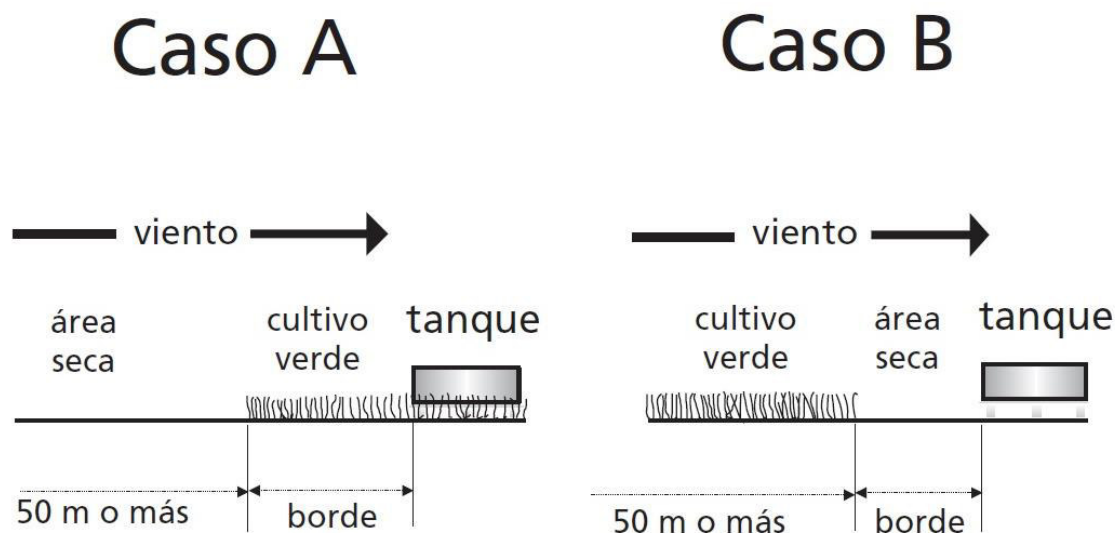
E_{pan} = evaporación del tanque de evaporación [mm. hora^{-1} o mm. día^{-1}]

Para seleccionar el coeficiente K_p apropiado para el tanque de evaporación, se debe considerar la cobertura del suelo donde se ubica o localiza el tanque, el viento y la humedad promedio del entorno. De acuerdo a FAO (2006) se presentan dos casos de ubicación del tanque generalmente: Caso A, cuando el tanque de evaporación se localiza en una zona de pasto corto

verde y está rodeado por un suelo en barbecho; y el Caso B, cuando el tanque de evaporación se localiza sobre un suelo en barbecho y está rodeado por un cultivo verde, tal como se muestra en la Figura 36.

Figura 36

Casos de Localización del Tanque de Evaporación Clase A para determinar el Kp



Nota: Tomado de localizaciones del Tanque de evaporación Clase A, 2006, FAO-56.

Para el cálculo del Kp, se utiliza las siguientes fórmulas (FAO,2006, p.82) donde:

- **Caso A:** *Kp cuando el Tanque Clase A este situado en cultivo verde circundante (Ecuación 14):*

$$K_p = 0,108 - 0,0286 * u^2 + 0,0422 * \ln(\text{Borde}) + 0,1434 * \ln(\text{HR}) - 0,000631 * [\ln(\text{Borde})]^2 * \ln(\text{HR})$$

- **Caso B:** *Kp cuando el Tanque Clase A este situado en suelo desnudo (Ecuación 15):*

$$K_p = 0,61 + 0,00341 * \text{HR} - 0,000162 * u^2 * \text{HR} - 0,00000959 * (u^2) * (\text{Borde}) + 0,00327 * u^2 * \ln(\text{Borde}) - 0,00289 * u^2 * \ln(86,4 * u^2) - 0,0106 * \ln(86,4 * u^2) * \ln(\text{Borde}) + 0,00063 * [\ln(\text{Borde})]^2 * \ln(86,4 * u^2)$$

Considerar en las ecuaciones a ln como logaritmo natural.

Donde, para ambos casos, A y B se indica que:

Borde = distancia del cultivo o área seca sobre el cual se localiza el tanque

HR = humedad relativa media [%] = $(HR_{max} + HR_{min})/2$

u_2 = velocidad del viento promedio medido a 2 m de altura

En las Figuras 37 y 38, se muestran los casos A y B de instalación del tanque de evaporación.

Figura 37

Tanque de evaporación Clase A situado sobre gramínea Caso A



Figura 38

Tanque de evaporación Clase A situado en suelo desnudo Caso B



2.4.2.3. Método Hargreaves

Como una de las opciones alternativas al método estándar de la FAO Penman-Monteith, en caso de no contarse con la mayoría de datos climáticos, la FAO (2006), recomienda estimar la ETo haciendo uso de la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), que utiliza valores de temperaturas (promedio, mínima y máxima) y de radiación solar extraterrestre.

La ecuación opcional y sus variables del método de Hargreaves modificado se presenta de la siguiente manera (FAO, 2006, p.64):

$$ETo_{Harg} = 0,0023(T_m + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} \times Ra \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

ETo_Harg = evapotranspiración de referencia en mm/hora o mm/día

Tm = temperatura media en °C

Tmax = temperatura máxima en °C

Tmin = temperatura mínima en °C

Ra = radiación solar extraterrestre, mm/hora o mm/día

El método de Hargreaves (1985) ha obtenido resultados aceptables para la evapotranspiración (en adelante ETo_Harg) en comparación con otros métodos basados en la temperatura del aire, que necesitan ajustes locales para lograr buenos resultados (FAO, 2006, pag.54).

Es relevante señalar que “La ecuación de Hargreaves subestima ETo en condiciones de mucho viento ($u_2 > 3 \text{ m.s}^{-1}$) y sobreestima la ETo en condiciones de humedad relativa alta” (FAO, 2006, pag.64).

a) Regresión de ajuste de métodos opcionales:

Para el ajuste de calibración de los resultados ETo de los métodos opcionales de Hargreaves o el tanque de evaporación Clase A, se considera una regresión lineal simple, de acuerdo a la recomendación del estudio FAO-56, considerando que este tipo de modelo es de menor complejidad y de mayor aplicación en meteorología e hidrología, basada en la suposición

de que dos variables tienen algún grado de relación en forma lineal. La ecuación general de la regresión lineal es dada por:

$$Y = a + b * X \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

Y = variable dependiente, variable ajustada o calibrada que se trata de predecir.

X = variable independiente, variable conocida.

a = intercepto, punto donde la línea de regresión cruza el eje Y.

b = pendiente de la línea o coeficiente de regresión.

Por lo tanto, se recomienda calibrarse o realizar el ajuste local de los resultados ETO obtenidos con los métodos opcionales y determinar los coeficientes empíricos de correlación según las ecuaciones lineales: $ETO_{FAO-PM} = a + b (ETO_{Epan})$ y $ETO_{FAO-PM} = a + b (ETO_{Harg})$, según corresponda.

2.4.3. Instrumentación y software para la implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una EMA

En la memoria descriptiva de la instalación de una EMA se deben cumplir los siguientes alcances generales:

- La instalación se debe realizar siguiendo los manuales operativos de instalación del fabricante, recomendaciones con respecto a especificaciones técnicas, instalación y manejo de los equipos y sus componentes según la OMM, US EPA y protocolo nacional de SENAMHI.
- Instalación de la EMA debe contar con su sistema de suministro de energía con panel solar, cerco perimétrico de protección, acceso habilitado y seguridad permanente.
- Se debe implementar el sistema de la telemetría para la estación EMA, el cual puede ser mediante transmisión por señal radio, wifi, celular o satelital que permite la transmisión,

visualización y descarga de datos en la computadora servidor a ubicada en la oficina del área usuaria.

A continuación, se describe, los componentes (hardware) y softwares requeridos para la instalación, visualización y descarga de información de la EMA, acorde con los parámetros para determinar la ETo con el método estándar de FAO Penman-Monteith:

2.4.3.1. Hardware e infraestructura para instalación de una EMA

2.4.3.1.1. Componentes principales de la EMA

La EMA debe estar compuesta por sensores meteorológicos reconocidos que presentan garantía de funcionamiento y cumplen con los requerimientos y guías de la OMM y US EPA, asimismo los sensores deberán estar conectados a un registrador de datos robusto y versátil, que permita configuraciones y actualizaciones internas como también el almacenamiento, procesamiento de valores (mínimo, promedio, máximo y total), cálculos internos y la transmisión de datos por intermedio de un telemetría inalámbrica para la visualización de datos en tiempo real (cada 01, 05 y 60 minutos) a la plataforma web de visualización y descarga de datos, contará asimismo con un sistema de suministro con panel solar y batería recargable de libre mantenimiento.

A modo de ejemplo, la EMA Shahuindo esta categorizada según el protocolo de instalación de estaciones meteorológica del SENAMHI como estación meteorológica automática ordinaria, pero cuyo propósito son con fines específicos para UM Shahuindo, la cual mide los siguientes parámetros:

- 1) Velocidad de viento (WS, Wind speed)
- 2) Dirección del viento (WDir, Wind direction)
- 3) Temperatura del aire (AT, Air temperature)
- 4) Humedad relativa (RH, Ambient relative humidity)
- 5) Presión Atmosférica (BP, Barometric pressure)

- 6) Evaporación (Epan, Pan evaporation level)
- 7) Radiación Neta (Rn, Net radiation)
- 8) Precipitación (Rain, Rainfall)

En la Tabla 13, se describe los componentes instalados en la EMA Shahuindo que ha permitido su funcionamiento a largo plazo con sus respectivos mantenimientos rutinarios y preventivos, asimismo mencionar que todos los sensores y componentes de las EMA presentados, son susceptibles a contar con actualizaciones o mejoras, en parte o todo, considerando que los fabricantes están en continua mejora:

Tabla 13

Especificaciones técnicas EMA Shahuindo

Descripción	Marca/Modelo (Tipo)	Rango / Capacidad/ Dimensión	Unidad	Resolución (Exactitud) ¹⁾
Velocidad de viento	R.M. Young Company/ 05103-S (Resistencia)	0 – 100	m/s	0,098 (± 0,3)
Dirección del viento	R.M. Young Company/ 05103-S (Inducción magnética)	0 – 360	° (Grados Sexagesimales)	0,1 (± 3)
Temperatura del aire	R.M. Young Company/ 41382VC (Platinum RTD)	-50 – +50	°C	0,1 (± 0,3)
Humedad relativa	R.M. Young Company/ 41382VC (Capacitor Rotronic Hygromer)	0 – 100	%	0,1 (± 1,0)
Presión Atmosférica	Vaisala Oyj/ PTB-110	500 – 1 100	hPa	0,1 (± 1,0)
Evaporación	Novalynx/255-100 (Sensor de Resistencia)	0 - 250	mm	0,64 (± 0,76)
	Novalynx/255-200 (Tanque Clase A)	0 - 254	mm	1,0
	Novalynx/ 255-100P/F (tubería y conector)	1,52	m	---
Radiación Neta	REBS/Q7.1	-500 - +2000	W/m ²	0,01 (1,0)
Precipitación pluvial	Met One Instruments Inc/382	0 – 76,2 mm/hr	mm	0,1
Registrador de datos	Campbell Scientific/CR1000 o CR1000X	4 Mb Capacidad	Megabytes	0,001 o mayor (± 0,01)
	Campbell Scientific/CR1000KD	--	--	
	Campbell Scientific/NL121	10/100	---	

Descripción	Marca/Modelo (Tipo)	Rango / Capacidad/ Dimensión	Unidad	Resolución (Exactitud) ¹⁾
Dispositivo de transferencia de datos – USB	Campbell Scientific/SC115	2 Mb Capacidad	Megabytes	---
Controlador fotovoltaico	Campbell Scientific/CH150	Input: 15 – 28 Output: 12 - 14	VDC	---
Batería de almacenaje	Genesis/NP24-12T	Input: 12 – 14	VDC	---
Panel solar	BP Solar / SX-420M	14.4 - 20	W	---

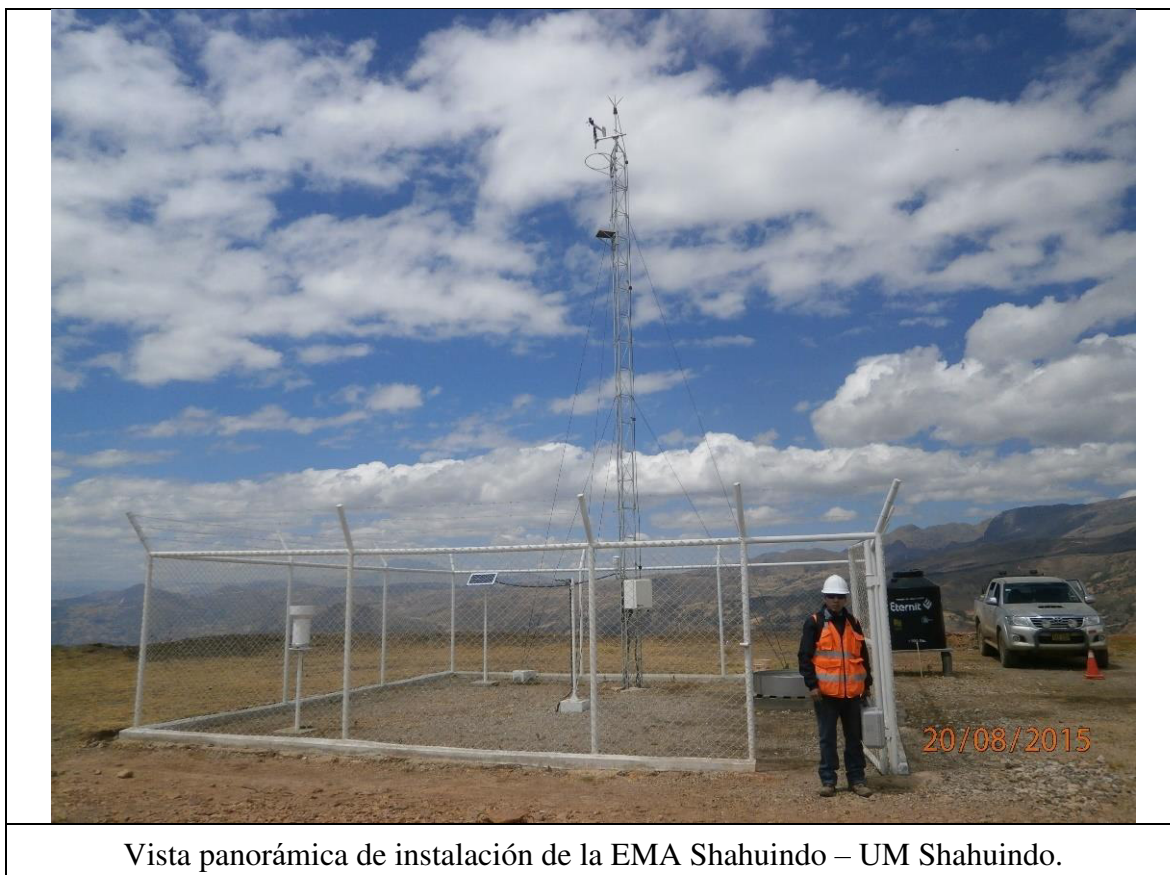
¹⁾Cumple criterios de instrumentos meteorológicos de las guías OMM y US EPA (2008).

Nota: Información técnica de sensores y componentes meteorológicos, 2013, Informe de Instalación EMA Shahuindo.

En la Figura 39, se presenta imágenes de la EMA Shahuindo y sus componentes en la etapa de su revisión y mantenimiento.

Figura 39

Vista de la EMA Shahuindo y sus componentes



Vista panorámica de instalación de la EMA Shahuindo – UM Shahuindo.



Capacitación en la operación de la EMA Shahuindo – UM Shahuindo.



Vista del sensor dual de velocidad y dirección del viento.



Vista del sensor de presión atmosférica.



Vista del sensor dual de temperatura y humedad relativa.



b) Registrador de datos:

Con respecto al *registrador de datos*, es considerado el componente esencial de toda EMA, y de acuerdo a la experiencia del autor, el modelo seleccionado y que ha demostrado gran versatilidad y confiabilidad en su programación, capacidad de almacenamiento, compatibilidad con la mayoría de sensores de otras marcas y que permite acceder a sus datos de manera segura y remota, es el modelo CR1000 de la marca Campbell Scientific Inc (Campbell, 2018), sobre el cual se fundamenta este trabajo siendo importante destacar que este modelo, permite la programación y hace posible de ingresar cálculos y secuencias como el cálculo del método estándar de ETo para estaciones automáticas.

Actualmente la versión vigente es el modelo CR1000X (Campbell, 2023), donde se han realizado mejoras a su antecesor CR1000, pero el principio de funcionamiento y configuración es el mismo (véase Figuras 40 y 41).

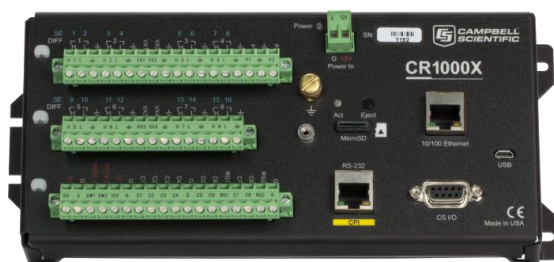
Sus aplicaciones principales para este tipo de registradores incluyen estudios de hidrología, geotecnia, perfil del viento, estación meteorológica, calidad del aire, agricultura, humedad suelo, alertas tempranas, ensayos automoción, SCADA y calidad del agua.

Figura 40

Registradores de datos modelos CR1000 y CR1000X de Campbell Scientific



Registrador de datos CR1000



Registrador de datos CR1000X (vigente)

Nota: Descripciones e imágenes extraídas de registradores de datos de la web del fabricante, 2023, Campbell Scientific Inc. <https://www.campbellsci.com/data-loggers>

En el anexo E, se presenta las especificaciones técnicas del registrador de datos modelo vigente CR1000X, con el objetivo de que el usuario pueda obtener más información sobre este tipo de dispositivos, que son los más importantes para el correcto funcionamiento de una EMA.

Figura 41*Gabinete del registrador de datos – EMA Shahuindo*

Vista panorámica del registrador de datos modelo CR1000 y explicación de su funcionamiento a personal de Medio Ambiente a cargo de la EMA Shahuindo.



Revisión de la operatividad del registrador de datos y componentes de la EMA Shahuindo

c) Sensores meteorológicos:

El SENAMHI (2013) indica que la EMA requiere contar con instrumentos calibrados y usar las técnicas correctas de observación y medición de variables para satisfacer las necesidades de los usuarios en áreas como el clima y la agricultura. Para tal fin los sensores al

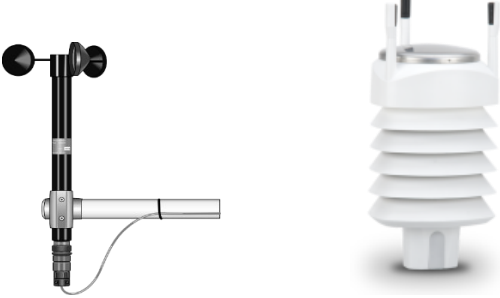

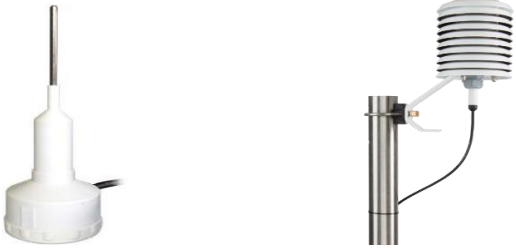
momento de su adquisición, deben ser proporcionados por el fabricante con el certificado de calibración que en algunos casos cumplen trazabilidad NIST o cumplen la calibración con certificación ISO 17025.

En la instalación, los sensores meteorológicos, pueden ser verificados su operatividad con patrones vigentes con la finalidad de determinar su correcto funcionamiento, en caso se tenga que ajustar los valores se debe seguir los procedimientos descritos en el manual de operación de cada fabricante.

A continuación, en la Tabla 14, se presenta a los principales sensores meteorológicos de acuerdo a al tipo de tecnología:

Tabla 14

Tipos de sensores meteorológicos para una EMA

Sensor	Tipos	Imágenes Referenciales
Velocidad de viento	Anemómetros de cazoletas, inducción magnética con hélice o sónicos (dual y no cuenta con partes mecánicas)	
Dirección del viento	Veletas potenciométricas, anemómetros o sónicos (dual y no cuenta con partes mecánicas)	
Temperatura del aire	Resistencias eléctricas, semiconductor, termistores y los termopares	

Sensor	Tipos	Imágenes Referenciales
Humedad relativa	Capacitivos que utilizan acondicionamiento interno	
Presión Atmosférica	Digitales piezorresistivos y transductores de presión	
Evaporación (Epan)	Sensor potenciométrico y tanque en acero inoxidable	 <p data-bbox="790 1176 1308 1209">Sensor y Tanque de evaporación Clase A - USA</p>
Radiación Neta y Solar	Radiómetros netos o piranómetros y pirgeómetros de fotocélula de silicio o termopila	
Precipitación pluvial	De balancín o basculantes	

2.4.3.1.2. Exactitud y resoluciones de los instrumentos:

Para US EPA (2008), indica que se puede considerar en términos de exactitud de componentes individuales o exactitud general del sistema. Por ejemplo, la precisión general de un sistema de medición de la velocidad del viento incluye las precisiones de los componentes individuales del anemómetro de copa o de hélice, señal del acondicionador, convertidor de analógico a digital y registrador de datos.

La guía OMM N°08 – Vol I (2021), también indica que los requisitos más importantes que deben cumplir o contar los instrumentos meteorológicos son los siguientes:

- a) Incertidumbre para el parámetro específico.
- b) Fiable y estable en el tiempo.
- c) Facilidad de instalación, funcionamiento, calibración y mantenimiento.
- d) Diseño simple y acorde con los requerimientos.
- e) Durabilidad para entornos hostiles.
- f) Costo adecuado de los instrumentos, bienes consumibles y piezas de repuesto.
- g) Presentar condiciones de seguridad para el personal y el entorno.

Cabe mencionar que la OMM (2021, p.16), considera a la exactitud como el término cualitativo cuya expresión numérica es la incertidumbre.

De otro lado el protocolo nacional de SENAMHI, a partir de setiembre del año 2013 adopta las recomendaciones de la OMM y de la US EPA, con la finalidad de estandarizar, adecuar e integrar los métodos de observación meteorológica, agrometeorológica e hidrológica de la red nacional de estaciones automáticas en el Perú.

En la Tabla 15, se presenta en resumen las características técnicas de exactitud, resolución, rango y altura de instalación de los sensores meteorológicos que actualmente en base a las recomendaciones de la US EPA, OMM y protocolo nacional del SENAMHI:

Tabla 15

Resumen de características técnicas de los sensores meteorológicos según US EPA, OMM y SENAMHI

Variable Meteorológica	Exactitud y resolución recomendadas del sistema - US EPA (2008) ¹⁾			Criterios de incertidumbre y resolución de Equipos - OMM N°8 (ed. 2014 - act. 2017 y Vol I-2021) ²⁾			Resumen de exactitudes, resolución y rango de sensores meteorológicos - Protocolo de SENAMHI (Setiembre, 2013) ⁴⁾				
	Exactitud	Resolución	Rango	Incertidumbre de medición alcanzable	Resolución	Rango	Exactitud	Resolución	Rango	Altura Instalación	Tipo de Sensor
Velocidad de viento	± 0,2 m/s + 5% de lectura	0,1 m/s	0,5 a 50 m/s	0,5 m/s para ≤ 5 m/s 10% para > 5 m/s	0,5 m/s	0 - 75 m/s	± 0,5 m/s for ≤ 5 m/s ± 10% for > 5 m/s	0,5 m/s o menos	0 - 50 m/s	10 m (o a otra altura específica)	Inducción magnética para la velocidad Del tipo acoplamiento óptico Del tipo ultrasónico
Dirección del viento	± 5 °	1,0 °	0 a 360°	5°	1°	0° - 360°	± 5° o mejor	1°	0° - 359°	10 m (o a otra altura específica)	Resistencia para la dirección Del tipo acoplamiento óptico Del tipo ultrasónico
Temperatura del aire	± 0,5 °C	0,1 °C	-20 a +40°C	0,2°C	0,1 °C	-80 a +60°C	0,2 °C	0,1 °C	-40 a +60°C	1,25 a 2 m	Termo-resistores metálicos (RTD, sigla en inglés) como: PT100 y PT1000 Termistores o resistores semiconductores (PTC, NTC) Termocuplas o bimetalicos.
Humedad relativa	± 5 %	0.50%	0 - 100 %	0,2 %	1%	0 - 100%	3%	1%	0 - 100%	1,25 a 2 m	Transductor tipo de condensador
Precipitación	± 10% del volumen	0,25 mm	0 - 30 mm/h	La mayor de 0,1 mm ó 5%	0,1 mm	0 - 500 mm (Cantidad diaria)	+0,1 mm para < 5 mm 2% para > 5 mm o mejor	0,2 mm o mejor	0 - 500 mm (Cantidad diaria)	1 a 1,5 m	Báscula oscilante Peso (Área captación: 200 cm ²)
Presión atmosférica	± 1 hPa	0,1 hPa	800 a 1100 hPa	0,15 hPa	0,1 hPa	500 - 1080 hPa	0,3 hPa	0,1 hPa	500 - 1050 hPa	1,5 a 2 m	Transductor de elementos de silicio o condensadores.
Radiación solar/neta	± 10 W/m ² debajo de 200 W/m ² ± 5% sobre 200 W/m ²	1 W/m ²	0 - 1200 W/m ²	15% ^(*)	1 J/m ² (1 W/m ²)	No especificado,	15% ^(*) (Según guía OMM N°8)	1 J/m ² (1 W/m ²) (Según guía OMM N°8)	No especificado,	1,5 a 2,5 m 4)	Piranómetros y pirgeómetros, u otros equipos de acuerdo a necesidades específicas.
Evaporación	No especificado,	No especificado,	No especificado,	0,1 mm para ≤ 5 mm 2% para > 5 mm	0,1 mm	0 a 100 mm	0,01 mm a 0,1 mm	0,1 mm	Rango operacional entre 5 a 7,5 cm del borde del tanque	15 cm de altura del suelo sobre base de madera tipo parihuela	Tanque de evaporación Clase A de US Weather Bureau (Dimensiones del tanque: 205 mm de altura y 120.6 mm de diámetro)

1 Volume IV: Meteorological Measurements version 2.0 Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Table 0-1 PAMS. USEPA, Marzo 2008

2 Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos OMM - N°8, ANEXO 1.E. Requisitos de Incertidumbre de las mediciones operativas y rendimiento de los instrumentos. OMM, 2017.

3 Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos OMM - N°8 Vol I, ANEXO 1.A. Requisitos de Incertidumbre de las mediciones operativas y rendimiento de los instrumentos. OMM, 2021.

4 Protocolo para la Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas, Agrometeorológicas e Hidrológicas del SENAMHI. Resolución Presidencial Ejecutiva N° 0174 SENAMHI-PREJ-OGOT/2013.

5 Manual Técnico de Instalación y Operación de Estaciones, Código MT-DRD-001, Versión 1, SENAMHI, 2021 :

- En caso emplear pluviómetros con área de colección, estos estarán comprendida entre 200 y 500 cm², para zonas desérticas se aceptará áreas de colección de 1000 cm², y para zonas lluviosas se aceptará áreas de colección de 100 cm².

- La resolución de precipitación líquida en una zona desértica será de 0.1 mm y en zonas lluviosas se acepta 0,3 mm.

Nota: Cuadro resumen elaborado por Juan Caycho B.

2.4.3.1.3. Parámetros horarios registrados en la EMA

A continuación, en la Tabla 16, se describen los parámetros meteorológicos y sus principales valores que se deben configurar y registrar en una EMA para evaluar las condiciones climáticas y también determinar la ETo en tiempo real:

Tabla 16

Parámetros horarios evaluados en una EMA

Sensor	Unidad	Valores Horarios medidos	Resolución final en los registros
Velocidad de viento	Metros por segundo (m/s)	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo (WS_min) • Promedio (WS_avg) • Máximo (WS_Max) 	0,01
Dirección del viento	Grados Sexagesimales (°)	<ul style="list-style-type: none"> • Promedio Vectorial (Windir) 	0,01
Temperatura del aire	Grados Celsius (°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo (AT_min) • Promedio (AT_avg) • Máximo (AT_max) 	0,01
Humedad relativa	Porcentaje (%)	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo (RH_min) • Promedio (RH_avg) • Máximo (RH_max) 	0,01
Presión Atmosférica	Hectopascal (hPa)	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo (BP_min) • Promedio (BP_avg) • Máximo (BP_max) 	0,01
Evaporación	Milímetros (mm)	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel Instantáneo (Evap_Level, nivel de agua al cumplir la hora) 	0,001
		<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de Evaporación (Tasa_Evap, diferencia de niveles entre horas) 	
		<ul style="list-style-type: none"> • Nivel Mínimo (Evap_min) • Nivel Máximo (Evap_max) 	
Radiación Neta	Watts por metro cuadrado (W/m ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo (RN_min) • Promedio (RN_avg) • Máximo (RN_max) 	0,01
Precipitación pluvial	Milímetros (mm)	<ul style="list-style-type: none"> • Total (acumulado) 	0,1
Evapotranspiración de referencia	Milímetros (mm)	<ul style="list-style-type: none"> • ETo 	0,001

Nota: La ETo de la tabla 16, se ha determinado con la ecuación estándar FAO Penman-Monteith, FAO-56.

2.4.3.1.4. Infraestructura para instalación de una EMA

Previo a la instalación de una EMA, se deben considerar de manera general lo siguiente:

- Las bases de concreto donde se fijarán los soportes de los sensores y componentes de la torre de 10 m o trípode meteorológico de 3 m, que se deben elaborarse previamente como parte de las obras civiles en el lugar definido de instalación de la EMA.
- El cerco perimétrico de acuerdo a las dimensiones establecidas en el protocolo nacional de SENAMHI (2013), que puede ser de 15 m por 10 m hasta un mínimo de 6 m por 6 m, de acuerdo al diseño y fin específico de la estación cuya finalidad es evitar el paso de personas no autorizadas, evitar el vandalismo y el paso de animales.
- El sistema de protección para tormentas eléctricas, deberán instalarse previamente para protección de la EMA, con la finalidad de mitigar los efectos de las tormentas eléctricas en zonas de presencia de estas.
- Puestas a tierra para el sistema electrónico de la estación.

En el Anexo C, se muestran referencialmente la distribución y dimensiones de los componentes y bases de concreto que deben colocarse previamente a la instalación de una EMA.

2.4.3.1.5. Principales actividades para la instalación de la EMA

En la Tabla 17, se presentan las actividades principales a realizarse para la instalación de una EMA y sus componentes:

Tabla 17*Actividades y responsables para instalación de un EMA*

Ítem	Actividades Generales	Responsable(s)	Días (aprox.)
1	Ubicación y habilitación (nivelación) del área del terreno (10 m por 10 m o mayor según el propósito de la estación) donde se instalará la EMA de acuerdo a las coordenadas de ubicación ya establecidas.	Usuario	07 días
2	Elaboración de bases de concreto para los componentes de la EMA, según planos.	Usuario	07 días
3	Instalación de cerco perimétrico pintado en blanco, según planos.	Usuario	07 días
4	Instalación de sistema de protección pararrayos y puestas a tierra.	Usuario	05 días
5	Instalación de componentes o instrumentación de la EMA en las bases de concreto instaladas previamente por el Cliente.	Personal calificado en EMA	02 días
6	Instalación de computadora servidor, instalación y configuración de softwares de la EMA y telemetría.	Personal calificado en EMA /Usuario	02 días
7	Pruebas de operación y conexión a la estación (y plataforma web) para visualización de datos.	Personal calificado en EMA	02 días
8	Capacitación en el funcionamiento de la estación y en el acceso a la plataforma de pantallas graficas del software de descarga de datos a personal usuario a cargo de la EMA.	Personal calificado en EMA /Usuario	01 día

El usuario encargado de la estación, deberá considerar los costos de personal, material y trabajos de construcción o albañilería, logística u otro para la instalación de los componentes de la EMA.

2.4.3.1.6. Mantenimientos de la EMA

Es importante realizar un mantenimiento periódico del lugar de instalación y los instrumentos de observación de la EMA, para evitar que la calidad de las observaciones se vea afectada. (OMM, 2017)

La EMA cuenta con componentes electrónicos y de desgaste mecánico (rodajes, ejes, etc), y los procedimientos de mantenimientos rutinarios, preventivos y correctivos, deben realizarse por personal entrenado y/o calificado en operación y mantenimiento de estaciones automáticas.

Las actividades de mantenimiento deben seguir los siguientes criterios generales, en concordancia a lo recomendado por el protocolo nacional (SENAMHI, 2013):

a) Mantenimiento rutinario

El mantenimiento rutinario se lleva a cabo para mantener en buen estado los elementos de la EMA (sensores, instrumentos, accesorios, soportes, panel solar, etc.) y su infraestructura. Con la finalidad de evitar que la exposición a la intemperie afecte las mediciones de los sensores como el polvo, restos vegetales e insectos, basura, etc.). En caso de contar con alguna observación deberá comunicarse inmediatamente a los superiores a cargo:

➤ Termohigrómetro (Temperatura del aire y humedad relativa)

Se debe realizar el mantenimiento periódico externo del protector de radiación y del filtro del sensor de temperatura en caso amerite por presencia de polvo impregnado. Este mantenimiento no necesita mucha especialización, pero debe ser realizado por personal capacitado.

➤ Sensor de velocidad y dirección de viento

Se debe revisar el estado físico del sensor de forma visual y comparar lo indicado por la veleta en la pantalla del equipo, considerando que este se encuentre a 10 m de altura, se recomienda trimestralmente realizar limpieza externa y verificar el estado de los rodajes.

➤ **Sensor de presión atmosférica**

Para el caso del sensor de presión atmosférica instalado dentro del recinto o gabinete, se debe verificar que la toma o entrada de medición del sensor no se encuentre obstruido, en el caso del sensor instalado fuera del recinto o gabinete, verificar la limpieza del dispositivo de protección y verificar que la toma de medición tampoco se encuentre obstruido.

➤ **Sensor de precipitación**

Se debe realizar la limpieza del embudo o área de captación del pluviómetro de partículas vegetales o insectos u objetos, que pueda obstruir el paso del agua a los balancines internos de medición.

➤ **Sensor de radiación neta**

Se debe realizar la limpieza periódica de manera externa y con cuidado del domo protector de radiación neta (o domos de vidrio o PTFE) en caso amerite por presencia de polvo impregnado con paño húmedo a fin de no ocasionar rayaduras, asimismo verificar que el sensor este nivelado con la burbuja que cuenta. En caso que los domos requieran reemplazo, se procederá con su reemplazo.

➤ **Sensor de evaporación**

Se debe mantener los niveles de agua en el tanque dentro del rango de 5 a 7.5 cm del borde del tanque de evaporación (OMM, 2021) con visitas entre 2 a 3 días, y cada 15 días o antes, se debe reemplazar toda el agua del tanque para evitar la turbidez por presencia de algas o partículas, tal como se muestra en las Figuras 42 y 43.

Este tipo de mantenimiento no requiere alta especialización, sin embargo, debe ser realizado por personal entrenado para tal fin.

Figura 42

Vista del mantenimiento rutinario del Tanque de evaporación Clase A

**Figura 43**

Revisión de los niveles de agua recomendados en el Tanque de evaporación Clase A



➤ **Área interna y externa de la estación:**

Es necesario conservar la vegetación dentro y fuera de la estación, evitando que el césped tenga una altura superior a 10 cm. La frecuencia de esta labor dependerá de las condiciones climáticas del lugar, aunque se sugiere realizar la limpieza de maleza o hierbas una vez al mes.

b) Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo de la EMA, debe ser ejecutado por personal capacitado o calificado, considerando que la manipulación de los sensores por personal no capacitado puede poner en riesgo el funcionamiento de la EMA.

Este mantenimiento incluye además un plan de reemplazo preventivo de partes, programados en base a las recomendaciones del fabricante de cada componente con la finalidad de evitar pérdidas de información por deterioro del algún componente, el mismo que debe contar con un presupuesto anual.

La frecuencia de ejecución del mantenimiento preventivo, se realiza de acuerdo a las condiciones particulares del lugar, siendo lo recomendable realizarlo trimestralmente afín de tener un mayor control de la operatividad electrónica de la EMA y que ha tenido de acuerdo a nuestra experiencia mejores resultados, en comparación a frecuencias anuales o semestrales. En el protocolo nacional menciona la recomendación de la OMM (2017) que la frecuencia de los mantenimientos sea efectuada en periodos semestrales, pero de acuerdo a nuestra experiencia dependerá de las condiciones de exposición del lugar, del tipo de componente instalado y de la frecuencia de mantenimiento recomendado por el fabricante.

c) Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento se realizará por personal técnico calificado, que cuente con los instrumentos o repuestos necesarios para el diagnóstico y reparación de un componente deteriorado o averiado de la EMA. La reparación o el reemplazo del componente debe ser acompañado de un testeo de operación de puesta en funcionamiento del componente.

d) La calibración y/o contrastación

Esta actividad deberá realizarse en un laboratorio especializado (SENAMHI, 2013) o en el lugar de instalación del EMA según el alcance de acreditación del laboratorio especializado basada en procedimientos ISO 17025, con una frecuencia de acuerdo al tipo de instrumento y a las recomendaciones del fabricante.

Las contrastaciones o verificaciones de calibraciones, como parte del control de operatividad para los sensores que ameriten o se tengan duda de su buen funcionamiento, se sugiere realizar por personal calificado en el punto de instalación del EMA con patrones vigentes como parte de la etapa del mantenimiento preventivo siguiendo las indicaciones de los manuales de los fabricantes, a fin de determinar las desviaciones de operatividad de los sensores y programar su reemplazo anticipado del componente y/o calibración respectiva en el laboratorio especializado.

Las certificaciones de calibración y/o contrastación de los sensores, normalmente tienen una vigencia anual o según lo especificado en su certificado. En el caso de los calibradores o patrones tienen una vigencia anual o mayor en caso sea especificado en el certificado.

2.4.3.2. Softwares de soporte

Para el diseño del programa y configuración interna del registrador de datos y de los sensores en la EMA, se requiere contar con los siguientes softwares de la marca Campbell Scientific Inc, que permiten la configuración del registrador de datos ya mencionado (CR1000) y comunicación, descarga y visualización de datos de la EMA:

- a) **Short Cut:** software de licencia libre, que permite edición básica y preliminar para la configuración de una estación meteorológica.
- b) **Editor CRBasic:** software con licencia para una sola computadora (versión de instalación) que permite editar programas de registro de datos en el lenguaje de programación BASIC.
- c) **VisualWeather:** software con licencia para una sola computadora, que permite la comunicación, visualización y descarga automática de datos de las estaciones meteorológicas remotas. (Opcionalmente se puede contar con el software LoggerNet en su versión actualizada v4.7, cuyo uso es más avanzado para la gestión y control de varias estaciones).

El equipo de cómputo (PC servidor) donde se instalarán los softwares mencionados, debe contar al menos con las siguientes características técnicas, según la Tabla 18:

Tabla 18

Características técnicas – Equipo de cómputo para Softwares

Sistema Operativo	Windows 7 o 10 o superior de 64 bits
Procesador	Intel Core i5 o superior
Memoria RAM	4 GB o superior
Unidad de disco duro	Disco duro Serial ATA o SSD de 250 GB
Tarjeta de gráficos	Tarjeta de gráficos 2GB memoria de gráficos.
Comunicaciones	Interfaz de red 10/100Base
Pantalla	Pantalla LCD de Alta Definición de 23,5 pulgadas
Dispositivos de entrada	Teclado estándar y mouse óptico.
Puertos Externos	01 puerto Ethernet RJ45 (10/100 LAN) (parte trasera) 02 o más puertos USB 2.0 (2 delantero) 01 puerto RS232
Conectividad Inalámbrica	LAN inalámbrica 802.11b/g2 (<i>Opcional</i>)

2.4.3.2.1. *Short Cut*

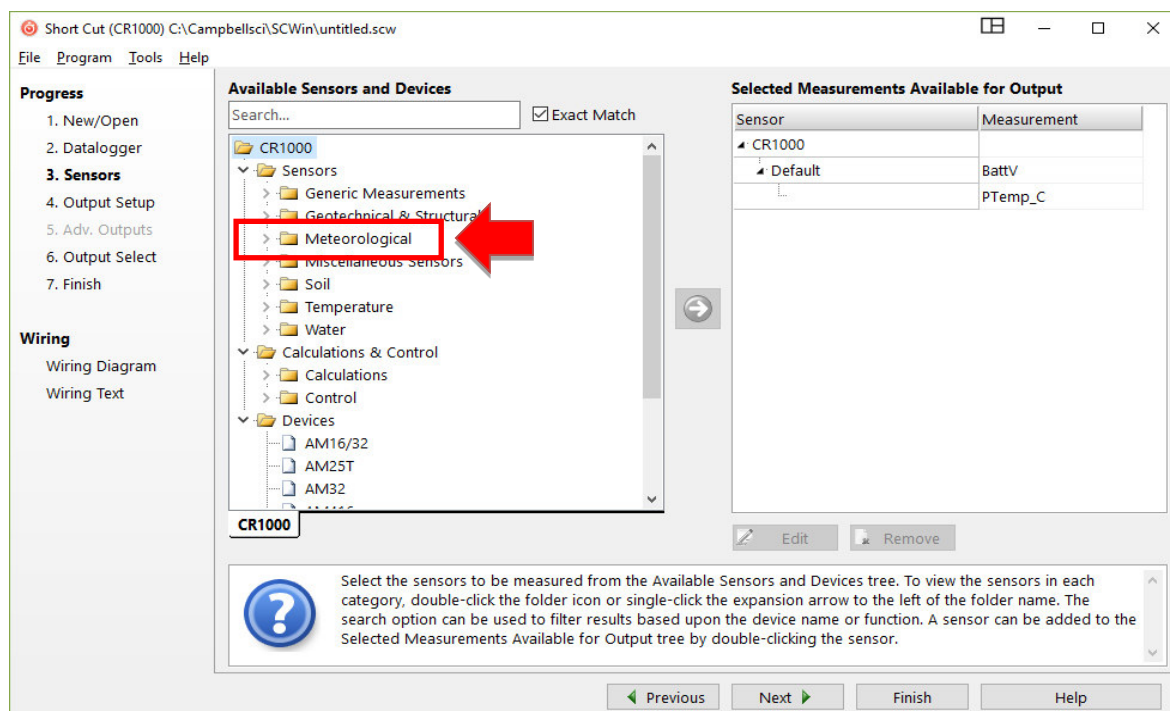
El Short Cut es un software que ayuda a crear programas para los registradores de Campbell; es el primer programa que configura la estación en pasos simples (Campbell, 2021).

- Se puede descargar de forma gratuita desde la página del fabricante.
- Genera un diagrama del cableado para imprimir, sólo para sensores programados y admitidos por la marca Campbell.
- Compatible con sensores estándar y sensores genéricos (por ejemplo, tipo puente, pulsos, etc.)
- Permite incluir cálculos matemáticos predeterminados en los resultados y también existe la opción que el registrador proporcione un valor final ETo basado a la ecuación de ASCE (American Society of Civil Engineers) de U.S.A., cuyo cálculo interno (algoritmo del sistema) lo realiza el registrador de manera automática, considerando valores de entrada, las lecturas de un sensor de radiación solar (R_s) y datos de localización de la estación, a partir del cual estima la radiación neta (R_n) y posteriormente la ETo estimada.
- Cabe recalcar que, en este trabajo, el autor desarrolla en las siguientes secciones la implementación paso a paso del método estándar de FAO Penman-Monteith para la determinación de la ETo según el Estudio FAO-56, utilizando los valores medidos y requeridos, como es el caso de los registros horarios de radiación neta y de las otras variables meteorológicas instaladas y medidas directamente por la EMA.

En la Figura 44, se presenta la ventana del software Short Cut.

Figura 44

Ventana del software Short Cut – Programación básica de una EMA



Nota: Adaptado de ventana principal de software Short Cut, 2021, Campbell Scientific Inc.

2.4.3.2.2. Editor CRBasic

El segundo programa con el que se debe contar para la programación de una EMA con registrador modelo CR1000(X), es el *Editor CRBasic* de Campbell Scientific, que permite modificar a nivel de usuario intermedio y/o avanzado los archivos creados en el Short Cut.

a) Características del programa Editor CRBasic

El Editor CRBasic es una herramienta de programación con un lenguaje similar al Basic en sintaxis, flujo y lógica de programación. Existen similitudes en las funciones presentes tanto en los lenguajes Basic como en el Editor CRBasic. (Campbell, 2022)

Cuenta con un amplio conjunto de instrucciones para programar medidas, crear tablas de datos (registros en diferentes tiempos de almacenamiento), cálculos instantáneos que soporta expresiones algebraicas, estadísticas y condicionales y configuración para comunicaciones.

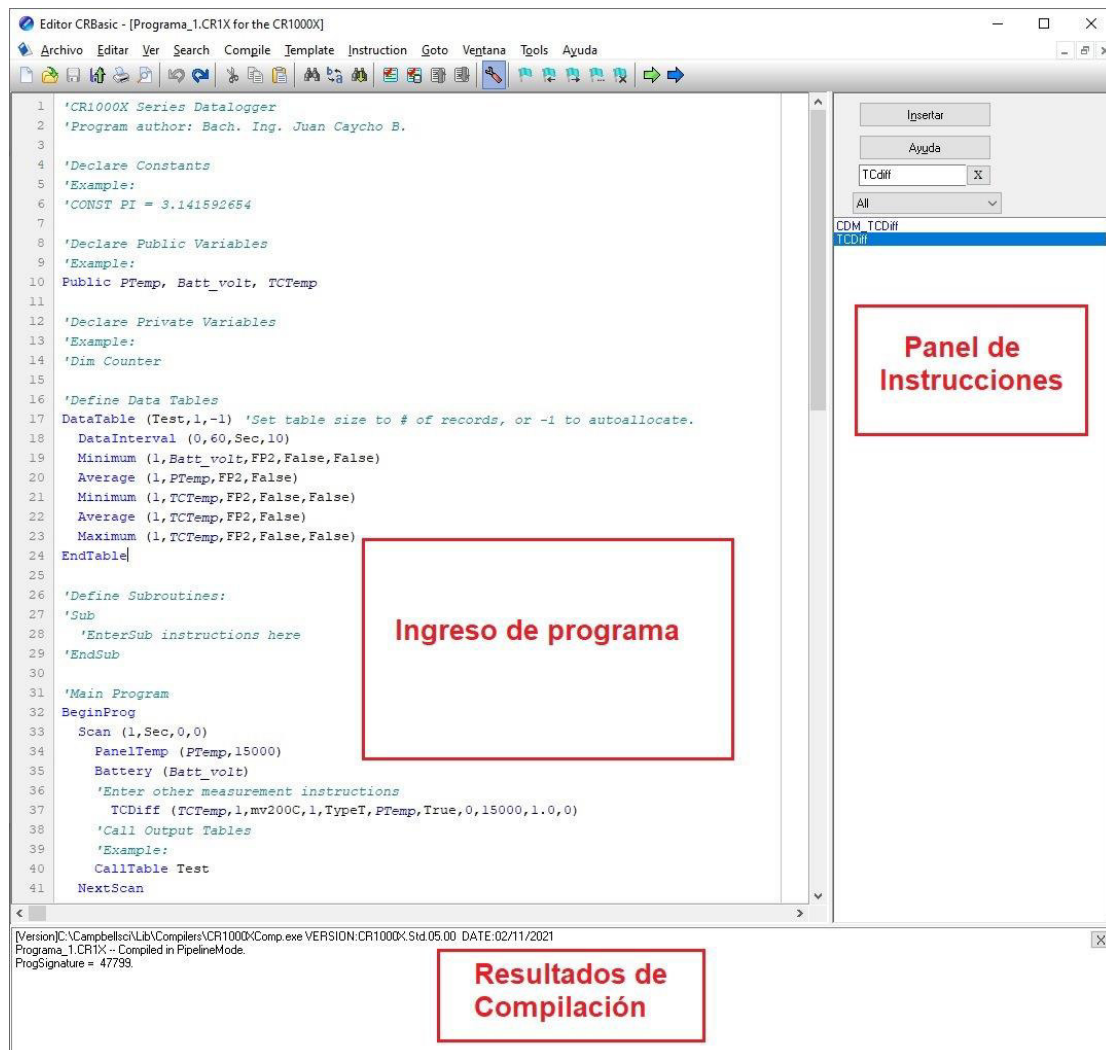
La ventana principal del Editor CRBasic se divide en dos partes (véase Figura 45), en

la ventana de ingreso o edición del programa y el panel de instrucciones. El panel de instrucciones es una lista que comprende las instrucciones en lenguaje Basic del CRBasic. Las instrucciones pueden seleccionarse de esta lista o escribirse directamente en la ventana de entrada del programa.

Cuando se compila o se ejecuta el programa en el Editor CRBasic, una tercera sección de la pantalla aparece en la parte inferior de la ventana y muestra un mensaje del resultado de la compilación del programa, que indica que la edición ha sido correcta o, por el contrario, presenta errores por corregir.

Figura 45

Ventana del software Editor CRBasic– Programación básica/avanzada de un EMA

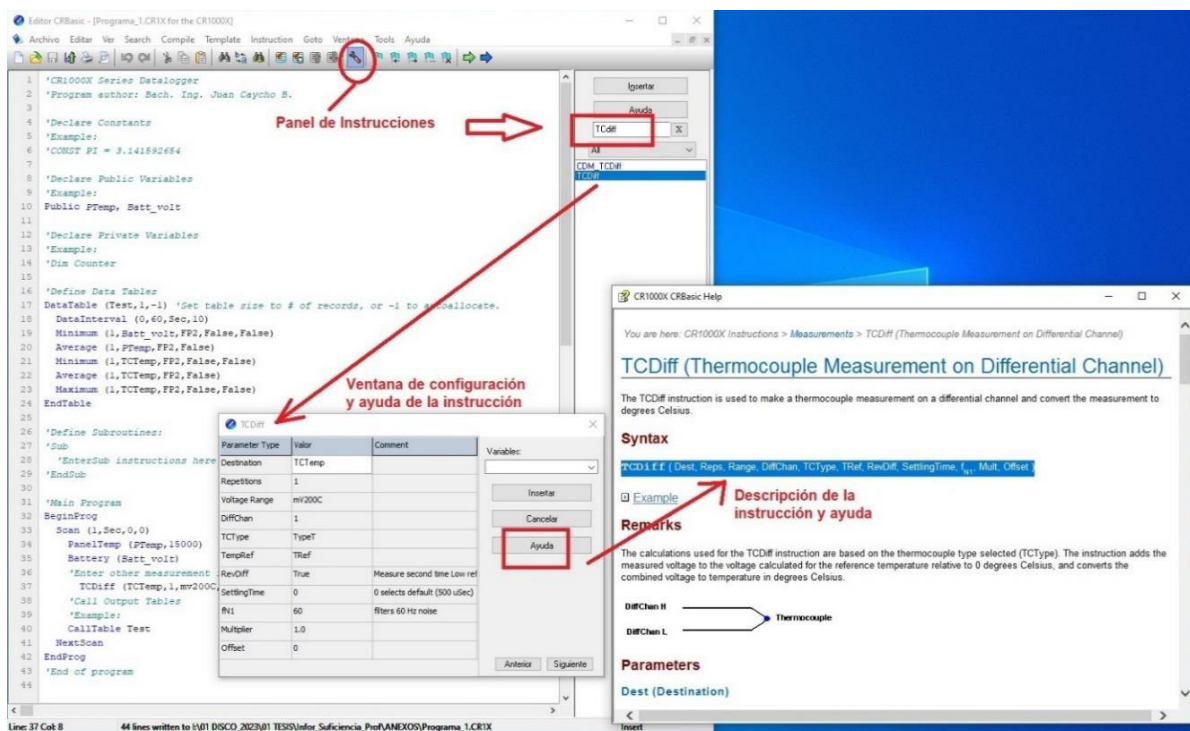


Nota: Adaptado de ventana principal de Software CRBasic Editor, 2022, Campbell Scientific.

El Editor CRBasic proporciona ayuda para las instrucciones que el usuario desea implementar, asimismo en las programaciones es posible que sea necesario modificar los ejemplos que proporciona el CRBasic, para reflejar o personalizar como, por ejemplo, el rango de voltaje, la cantidad de puertos u otras capacidades específicas del modelo de sensor que se está instalando en el registrador de datos. En la Figura 46, se presenta la ventana ayuda del software Editor CRBasic.

Figura 46

Ventana de ayuda del software Editor CRBasic



Nota: Adaptado de ventana de ayuda de software Editor CRBasic, 2022, Campbell

Scientific Inc.

b) Extensiones de los programas en Editor CRBasic

El Editor CRBasic muestra listas de instrucciones, archivos de ayuda y compilador según el tipo de archivo basado en el registrador de datos. Campbell cuenta con una serie de registradores, por lo tanto, se debe tener cuidado al elegir el registrador a configurar y sobre la cual se basan las secuencias y ayuda del Editor CRBasic, para nuestro caso el CR1000 cuenta con una extensión *.CR1 y el modelo CR1000X cuenta con la extensión *.CR1X.

c) Programa ejemplo en el Editor CRBasic

En el siguiente programa se proporciona las secuencias y códigos de ejemplo de un programa en CRBasic con extensión *.CR1X.

El programa de ejemplo, mide la temperatura del registrador de datos (PanelT) de un registrador de datos modelo CR1000X y usa ese valor como referencia para ajustar la medición de un sensor de temperatura tipo termopar (TCTemp).

Para evitar confusión o error en la programación, se considera el punto como separador decimal (.) en las secciones de este informe correspondientes a la sintaxis del programa Editor CRBasic.

Las líneas de texto precedidas por una comilla simple (') son comentarios. Se ignoran cuando se compila y se ejecuta el programa en el registrador. Los comentarios se utilizan para explicar lo que hace en el programa y proporciona información relevante sobre instrucciones específicas, en el ejemplo se encuentran en fuente color verde:

a) Programa ejemplo:

'a) INICIO DEL PROGRAMA:

'Modelo Registrador CR1000X

'Autor del programa: Bach. Ing. Juan Caycho (caychob@yahoo.es) - Fecha: 15/03/2023

'Descripcion: Programa para medir un termopar diferencial

'b) SECCION VARIABLES:

'Variables públicas que se utilizarán en el programa y que se visualizarán en pantalla
Public PanelT, TCTemp

'c) SECCION TABLAS O REGISTROS DE SALIDAS:

'Crea una tabla de datos denominada TempData

DataTable (TempData,1,-1)

'Establece el intervalo de almacenamiento de datos, cada 60 minutos u horario

DataInterval (0,60,Min,10)

'Registro del valor de la variable PanelT (Temperatura del registrador)

Sample (1, PanelT, FP2)

'Registro del valor de la variable TCTemp (Temperatura del Termopar)

Sample (1, TCTemp, FP2)

EndTable

'c) SECCION PROGRAMA PRINCIPAL Y CALCULOS:

BeginProg

'Establece el intervalo de escaneo del programa en 1 segundo

Scan (1,Sec,3,0)

'Medir la temperatura del panel; almacena el resultado en la variable PanelT

PanelTemp (PanelT, 15000)

'Medir la temperatura del Termopar y se almacena el resultado en la variable TCTemp

TCDiff (TCTemp,1, mv200C,1,TypeT,PanelT,True ,0, 15000 ,1.0,0)

'Llamado de las tablas de datos

CallTable

TempData

'Regresa al principio del programa; programa ejecutado en el siguiente intervalo de escaneo

NextScan

EndProg *'fin del programa*

Con este programa, se obtiene resultados cada 60 min de las variables PanelT y TCTemp en un archivo nativo de extensión *.dat, que luego es exportado a una hoja Excel para su tabulación y revisión por el usuario.

El programa anterior, contiene los códigos de un programa de ejemplo para todas las instrucciones en el registrador de datos modelo CR1000X, para pruebas en un registrador del modelo indicado debe retirar las tildes del código (no se admiten tildes o símbolos especiales en la programación).

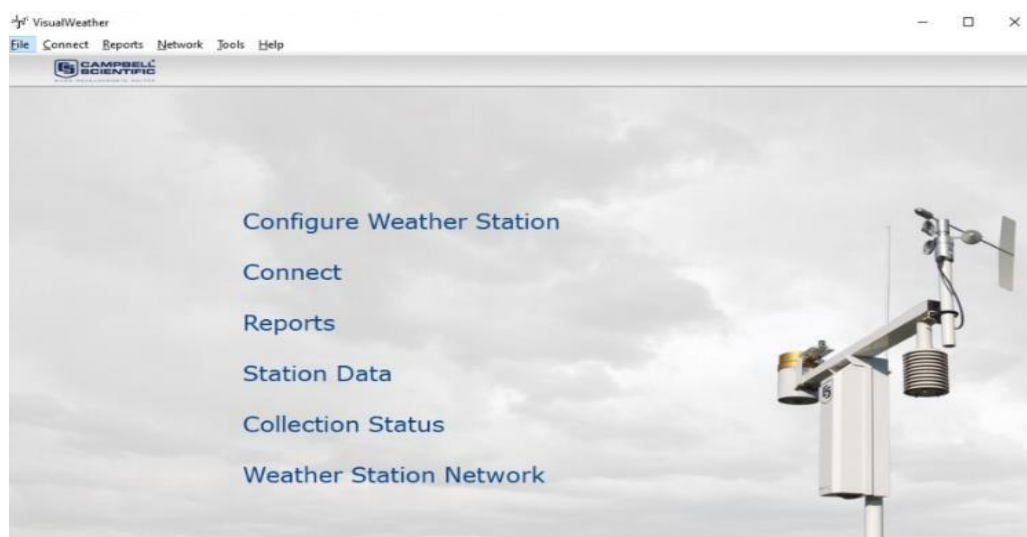
2.4.3.2.3. Software VisualWeather

El software VisualWeather v3.1.3, está diseñado para funcionar con los modelos de estación meteorológica preconfigurados ET106, ET107, Toro T107 y MetData1 de Campbell Scientific o estaciones meteorológicas configuradas a medida con registradores como el CR1000, CR1000X, CR800 y CR300 series (Campbell, 2012).

En la Figura 47, se muestra la pantalla principal del VisualWeather.

Figura 47

Ventana del software VisualWeather – Descarga de datos de un EMA



Nota: Adaptado de ventana principal de software VisualWeather, 2022, Campbell Scientific Inc.

De manera general, este software permite lo siguiente:

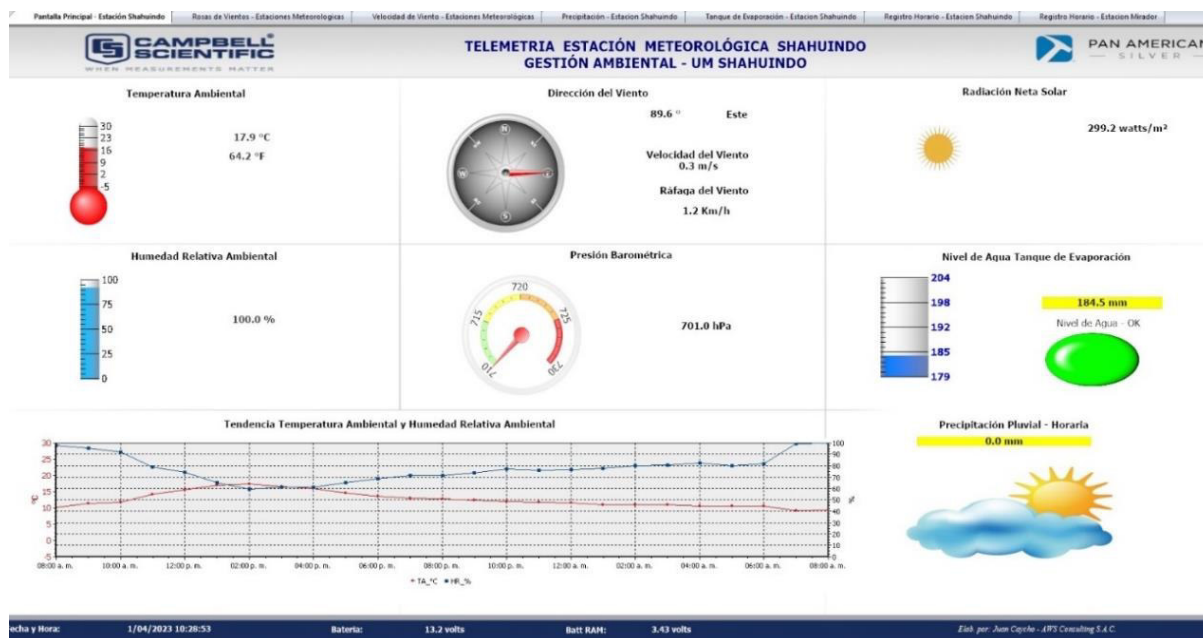
- Crear y enviar programas a una o más estaciones meteorológicas.
- Seleccionar el modo de comunicación (por ejemplo, ethernet, módem telefónico o RF) para cada estación meteorológica.
- Definir el horario de recuperación de la información para cada estación.
- Imprimir un resumen de la configuración de cada estación meteorológica.
- Realizar procesamiento posterior de los datos recuperados para producir informes meteorológicos y agrícolas (por ejemplo, evapotranspiración, punto de rocío).
- Exportar los datos recuperados a un archivo *.dat, para que pueda importarse a una hoja de cálculo u otro paquete de software para el procesamiento posterior de datos.
- Contar con una pantalla gráfica de las condiciones meteorológicas actuales (RTMC, siglas de real-time monitoring and control) de una o varias estaciones meteorológicas.

En la Figura 48, se presenta la pantalla gráfica que ofrece el VisualWeather y permite a

los usuarios visualizar y supervisar los valores meteorológicos en tiempo real de la EMA Shahuindo.

Figura 48

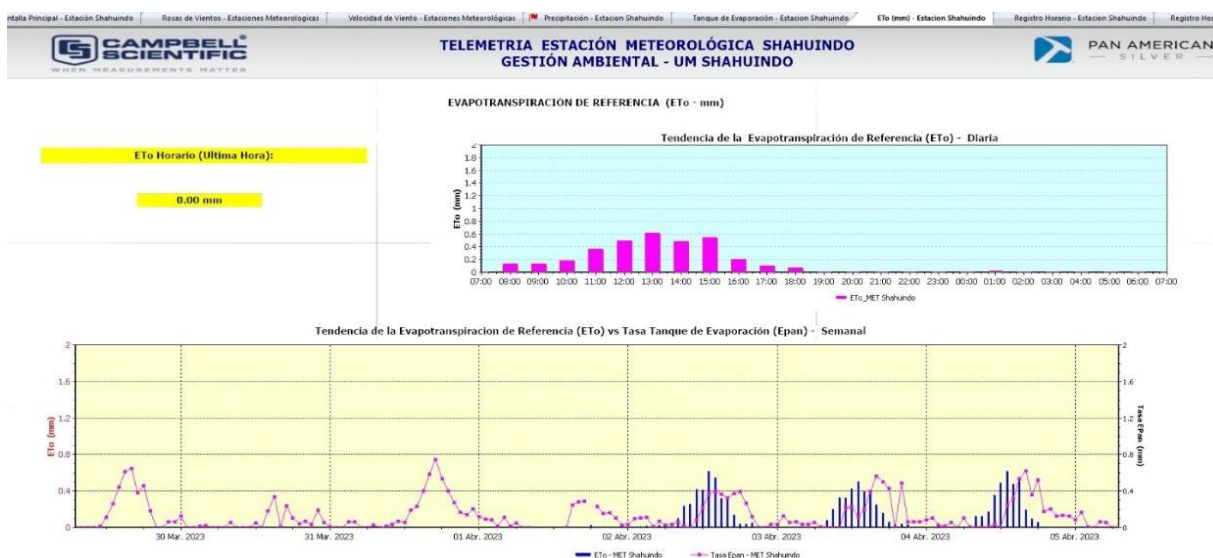
Pantalla gráfica de telemetría de datos RTMC – EMA Shahuindo



En la Figura 49, se presenta la pantalla gráfica que ofrece el VisualWeather donde se muestran los valores de evapotranspiración de referencia ETo (FAO Penman-Monteith) medidos a nivel horario por la EMA Shahuindo.

Figura 49

Pantalla gráfica de telemetría de datos de ETo – EMA Shahuindo



2.4.4. Desarrollo e implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en lenguaje de programación Basic para una EMA

Según FAO (2006), la ecuación estándar de FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia – ETo con datos diarios produce resultados correctos, pero en condiciones donde se cuente con una EMA y registros a nivel horarios y/o menores, se puede automatizar la información y obtener los valores por horas con mejores resultados.

Para el desarrollo e implementación del método estándar FAO Penman-Monteith del ETo en lenguaje de programación Basic, el autor, ha revisado detalladamente las variables y ecuación del método estándar previamente en el programa excel y posteriormente fue implementado en el lenguaje Basic con el software Editor CRBasic que genera los programas admitidos por los registradores modelo CR1000 de la marca Campbell Scientific Inc., en este caso el archivo creado resultado de este desarrollo, se encuentra en formato *.CR1 el cual contiene los códigos y secuencias de configuración y operación de los sensores y del registrador de la EMA, para lo cual realizó de manera general el siguiente procedimiento:

- **Diseño en Excel:**

- Revisión preliminar del método estándar ETo de la FAO (2006).
- Con respecto a los datos o variables meteorológicas, se han considerado las siguientes de acuerdo al documento de la FAO (2006, pp.74-75):
 - ✓ Temperatura del aire: promedio horario de temperatura (Thr) en °C.
 - ✓ Humedad del aire: promedio horario de humedad relativa (HR) en %.
 - ✓ Velocidad del viento: promedio horario de velocidad del viento a 2 m de altura (u2) en $m.s^{-1}$ o m/s.
 - ✓ Radiación: promedio horario de la Radiación neta (Rn) en $W.m^{-2}$ o W/m^2 .
 - ✓ Presión Atmosférica: promedio horario de la Presión Atmosférica (P) en hPa.

En el caso que sólo se cuente con valores de radiación solar (R_s), el usuario debe referirse y utilizar la formulas adicionales descritas en la guía de la FAO-56 para obtener el valor final de R_n estimada, considerando los datos adicionales como son la fecha de medición, coordenadas de ubicación y altitud de la estación meteorológica, entre otros.

- Los registros horarios de la EMA, fueron tabulados, ordenados y validados, posteriormente se elaboraron las fórmulas respectivas de las variables que ingresan en la ecuación general del método estándar ETo, según las ecuaciones 02, 03, 04, 06, 07, 09, 10 y 12 de este informe.
 - Los resultados anteriores, se integraron en la formula general de la ecuación 01 del método estándar de ETo de FAO Penman-Monteith, verificando y validando los resultados con las fórmulas detalladas en el estudio de la FAO-56 (excel base).
- **Diseño del programa en lenguaje Basic:**
 - Las secuencias anteriores fueron implementadas y adaptadas en el lenguaje de programación admitido por el software Editor CRBasic, considerando adicionalmente las variables y las tablas adicionales que se requerían para que los cálculos sean en paralelo a la lectura de la misma hora de reporte de las variables de salida o resultados (output).
 - Se realizaron una serie de pruebas cargando el programa (*.CR1) con una laptop al registrador de la EMA y posteriormente se verificó y valido los resultados del método estándar ETo de la FAO, en los registros horarios reportados por la estación con las ecuaciones del excel base y las ecuaciones del estudio FAO-56.

En la Figura 50, se presenta la sección principal del programa desarrollado en lenguaje Basic por el autor con el Editor CRBasic, donde se visualiza la secuencia de los cálculos para

determinar el ETo a nivel horario, el programa completo que incluye las secciones complementarias de variables y configuración de los sensores se encuentra en el Anexo D.

Figura 50

Método Estándar ETo – FAO Penman Monteith en lenguaje de programación Basic

```

228 '#####
229 'Eto hourly - FAO Penman-Monteith (FAO-56)
230 'Calculation with the Net Radiation - created for Bach. Ing. Juan Caycho B.:
231
232 'RN_Mj=W/m2 *0.0036 - Net radiation (Rn)
233 RN_MJ= (Cal_01.NRad_cws_avg(1,1))*0.0036
234
235 'Ghr =Mj/m2 - Ground heat flux density (G)
236 If RN_MJ>0 Then
237     Ghr=RN_MJ*0.1
238 Else
239     Ghr=RN_MJ*0.5
240 EndIf
241
242 'Y=Kpa/c - Psychrometric Constant
243 Y =(Cal_01.BP_avg(1,1))*0.1*(0.665/1000)
244
245 'U2=m/s - Wind speed at 2 meters
246 U2=(Cal_01.WS_avg(1,1))*(4.87/(LN(67.8*(ZWs)-5.42)))
247
248 'Thr=deg C - Temp average hourly
249 Thr= Cal_01.AT_avg(1,1)
250
251 'Psv=kPa - Saturation Vapor Pressure at air temperature
252 Psv=(0.6108*EXP(17.27*Thr/(Thr+237.3)))
253
254 'ea=Kpa - Real Saturation Pressure
255 ea=(Psv*Cal_01.RHum_avg(1,1)/100)
256
257 'Ssvpt=Kpa/c Slope of the Saturation Vapor Pressure - Temperature
258 Ssvpt=(4098*(0.6108*EXP((17.27*Thr)/(Thr+237.3)))/(Thr+237.3)^2)
259
260 'Eto - Reference Evapotranspiration Calculation Hourly (ETo_FAO-PM):
261 ETo=(0.408*Ssvpt*(RN_MJ-Ghr)+Y*(37/(Thr+273))*U2*(Psv-ea)/(Ssvpt+Y*(1+(0.34*U2)))
262
263 'Sequence to remove negative values from ETo and save the new value as EToc:
264 Etoc=Eto
265 If Etoc<0.0 Then Etoc=0.0
266
267 'End of program for ETo.
268
269 '#####

```

2.4.4.1. Explicación y desarrollo de la ecuación FAO Penman-Monteith en lenguaje de programación Basic del Editor CRBasic

A continuación, se explica la secuencia de cálculos y variables que se presentaron en la Figura 50 para obtener los valores ETo según el método estándar en el registro horario de una EMA con registrador de datos modelo CR1000, asimismo, para evitar confusión o error, el autor, recalca considerar el punto como separador decimal (.) en esta sección, de acuerdo a la sintaxis de programación BASIC utilizado por el Editor CRBasic:

- 1) Los registros horarios de Radiación Neta (Rn) de W/m^2 son convertidos a unidades en MJ (Variable *RN_MJ* en el programa) según la ecuación 02:

*'RN_Mj=Rn en W/m2 *0.0036*

*RN_MJ= (Cal_01.NRad_cws_avg(1,1))*0.0036*

Nota: Los valores recientes de Rn promedio horario (NRad_cws_avg), son obtenidos de un registro (tabla) auxiliar horario (Cal_01) para utilizarlo en los cálculos internos previo a su almacenamiento en simultáneo al registro horario principal (MET_HORARIO) de reporte completo de todas las variables medidas por la EMA.

- 2) Se determina el Flujo de Calor del Suelo (Variable *Ghr* en el programa) horario en MJ/m^2 , para los periodos diurnos y nocturnos en base a los valores de radiación neta (*RN_MJ*):

'Ghr=MJ/m²

If RN_MJ>0 Then

*Ghr=RN_MJ*0.1 'Para periodos diurnos (De ecuación 03)*

Else

*Ghr=RN_MJ*0.5 'Para periodos nocturnos (De ecuación 04)*

EndIf

- 3) Se determina la Constante Psicrométrica (γ) en unidades de Kpa/°C, a partir del valor reciente de la Presión Atmosférica (variable BP en el programa) que se encuentra en unidades hPa:

$$\gamma = (\text{Cal_01.BP_avg}(1,1)) * (0.665/1000) * 0.1 \quad (\text{De ecuación 06})$$

Nota:

Los valores recientes de BP promedio horario (BP_avg), son obtenidos del registro auxiliar horario (Cal_01) para utilizarlo en los cálculos internos previo a su almacenamiento en simultáneo al registro horario principal (MET_HORARIO) de reporte completo de todas las variables medidas por la EMA.

- 4) Se determina la Velocidad del viento a 2 metros de altura (u_2) en unidades de m/s, a partir del valor reciente de la velocidad del viento (W_s) medida a otra altura ZW_s (Variable constante = 10 m), para este caso el sensor se encuentra instalado a 10 metros de altura:

'Constante $ZW_s = 10$

$$u_2 = (\text{Cal_01.WS_avg}(1,1)) * (4.87 / (\text{LN}(67.8 * (ZW_s) - 5.42))) \quad (\text{De ecuación 07})$$

Nota:

Los valores recientes de velocidad del viento (WS_avg) medidos a 10 metros, son obtenidos del registro auxiliar horario (Cal_01) para utilizarlo en los cálculos internos para determinar la u_2 en tiempo real previo a su almacenamiento en simultáneo al registro horario principal (MET_HORARIO) de reporte completo de todas las variables medidas por la EMA.

- 5) Se asigna el promedio de la temperatura horario (AT en el programa) en grados Celsius °C a la variable Thr para los cálculos.

Thr=deg C Temp average

$$Thr = \text{Cal_01.AT_avg}(1,1)$$

Nota:

Los valores promedio horario de la temperatura ambiental (AT_avg) de la estación meteorológica, son obtenidos del registro horario (Cal_01) para utilizarlo en los cálculos internos como Thr en tiempo real previo a su almacenamiento.

- 6) Se determina la Presión de Saturación de Vapor (e°) en unidades Kpa asignado a la variable Psv para los cálculos:

'e°= Psv

$$Psv = (0.6108 * \text{EXP}(17.27 * Thr / (Thr + 237.3))) \quad (\text{De ecuación } 09)$$

Nota:

Los valores promedio horario de la temperatura ambiental son obtenidos de la variable Thr para utilizarlo en los cálculos internos previo a su almacenamiento.

- 7) Se determina la Presión Real de Vapor (e_a) en unidades Kpa asignado a la variable e_a para los cálculos internos:

'e_a=Kpa

$$e_a = (Psv * \text{Cal_01.RHum_avg}(1,1) / 100) \quad (\text{De ecuación } 10)$$

Nota:

Los valores promedio horario de la humedad relativa ambiental son obtenidos de la variable RHum_avg y de la presión de saturación del vapor a la temperatura de la misma hora (Psv) del registro horario Cal_01.

- 8) Se determina la Pendiente de la Curva de Presión de Saturación de Vapor (Δ) en Kpa/°C a la variable Ssvpt para los cálculos internos del registrador de datos, considerando que en el lenguaje Basic no se admite símbolos (Δ) como variables:

$\Delta = S_{svpt}$ en Kpa/°C *Slope of the Saturation Vapor Pressure - Temperature*

$$S_{svpt} = (4098 * (0.6108 * \exp((17.27 * Thr) / (Thr + 237.3)))) / (Thr + 237.3)^2 \quad (\text{De ecuación 12})$$

Nota:

Los valores promedio horario de la temperatura ambiental son obtenidos de la variable Thr para utilizarlo en los cálculos internos previo a su almacenamiento.

- 9) Se determina la Evapotranspiración de referencia (ETo) en mm/h asignado a la variable ETo para los cálculos internos del registrador de datos, para el cual se utiliza la **ecuación 01 (Método Estándar Horario FAO Penman-Monteith)**, según las variables calculadas en paralelo y en el mismo periodo de registro por la EMA:

ETo - Reference Evapotranspiration Calculation Hourly (ETo_FAO-PM):

$$ETo = (0.408 * S_{svpt} * (RN_MJ - G_{hr}) + Y * (37 / (Thr + 273)) * U_2 * (P_{sv} - e_a)) / (S_{svpt} + Y * (1 + (0.34 * U_2)))$$

Donde:

ETo = ETo_FAO-PM, evapotranspiración de referencia [mm. hora⁻¹] de

Ecuación 01

RN_MJ = Rn, radiación neta en la superficie de referencia [MJ.m⁻². hora⁻¹]

G_{hr} = G, densidad del flujo del calor del suelo [MJ.m⁻². hora⁻¹]

Thr = promedio horario de la temperatura del aire [°C]

S_{svpt} = Δ, pendiente de la curva de presión de saturación de vapor en Thr [kPa.°C⁻¹]

Y = γ, constante psicrométrica [kPa.°C⁻¹]

P_{sv} = e^o, presión de saturación de vapor a temperatura del aire Thr [kPa]

e_a = e_a, presión real de vapor [kPa]

u₂ = promedio de la velocidad del viento a 2 metros de altura [m.s⁻¹]

Finalmente, para eliminar algunos valores negativos de ETo_FAO-PM, que pueden presentarse durante la noche y en presencia de valores altos de humedad, se agrega una secuencia final (opcional) que cuando sea menor a cero el resultado, los valores ETo finales (EToc) sean igual a cero (0.0), entonces:

EToc=ETo_FAO-PM

If Etoc<0.0 Then Etoc=0.0

'Fin secuencias para ETo_FAO-PM.

NOTAS IMPORTANTES:

- El programa completo con extensión *.CR1 se encuentra en el Anexo D donde se encuentran otras secuencias y configuraciones adicionales relacionados a los sensores que permiten a la EMA con registradores modelo CR1000 de la marca Campbell Scientific, funcionar adecuadamente y realizar los cálculos respectivos.
- Cabe indicar que tanto el ETo (ETo-FAO-PM) y EToc, son reportados en los registros horarios de la EMA, en columnas diferentes a manera de control de datos, en caso el usuario requiera revisar su información posteriormente.
- El autor recomienda, que el registrador cuente con la última versión de su firmware.

2.4.4.2. Ejemplo de determinación de la ETo FAO Penman-Monteith con datos horarios:

En la Tabla 19, a manera de ejemplo, el autor, presenta el cálculo de la ETo con información meteorológica de los promedios horarios de las 08:00 horas y 14:00 horas del 20 de agosto 2021 de la EMA Shahuindo, aplicando las ecuaciones descritas en las secciones anteriores:

Tabla 19*Ejemplo de determinación horaria de la ETo FAO Penman-Monteith*

Datos climáticos medidos		08:00 horas	13:00 horas	Unidades
• Thr: Temperatura del aire promedio horario		14,04	23,04	°C
• HRhr: Humedad relativa promedio horario		67,6	36,64	%
• uz: Velocidad del viento promedio horario a 10 m de altura		0,62	2,93	m.s ⁻¹
• Rn: Radiación neta promedio horario		84,3	548,4	W.m ⁻²
• P: Presión atmosférica promedio horario		721,5	719,9	hPa
Conversión unidades de parámetro Rn				
De la Ecuación 02	Rn	0,3154	2,088	MJ.m ⁻² .hora ⁻¹
Velocidad del viento a 2 m				
De la Ecuación 07	u2	0,467	2,188	m.s ⁻¹
Flujo de Calor del Suelo				
De la Ecuación 03	Ghr	0,0315	0,209	MJ.m ⁻²
Constante Psicrométrica				
De la Ecuación 06	γ	0,04798	0,04787	Kpa.°C ⁻¹
Presión de saturación de vapor				
De la Ecuación 09	$e^{\circ}(Thr)$	1,603	2,816	Kpa
Presión Real de saturación de vapor				
De la Ecuación 10	ea	1,083	1,032	Kpa
Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor				
De la Ecuación 12	Δ	0,104	0,170	Kpa.°C ⁻¹
Evapotranspiración de referencia				
De la Ecuación 01	ETo	0,085	0,606	mm.hora ⁻¹

Nota: De los cálculos anteriores, la evapotranspiración de referencia (ETo) para las 08:00 horas es 0,085 mm.hora⁻¹ y para las 13:00 horas es 0,606 mm.hora⁻¹.

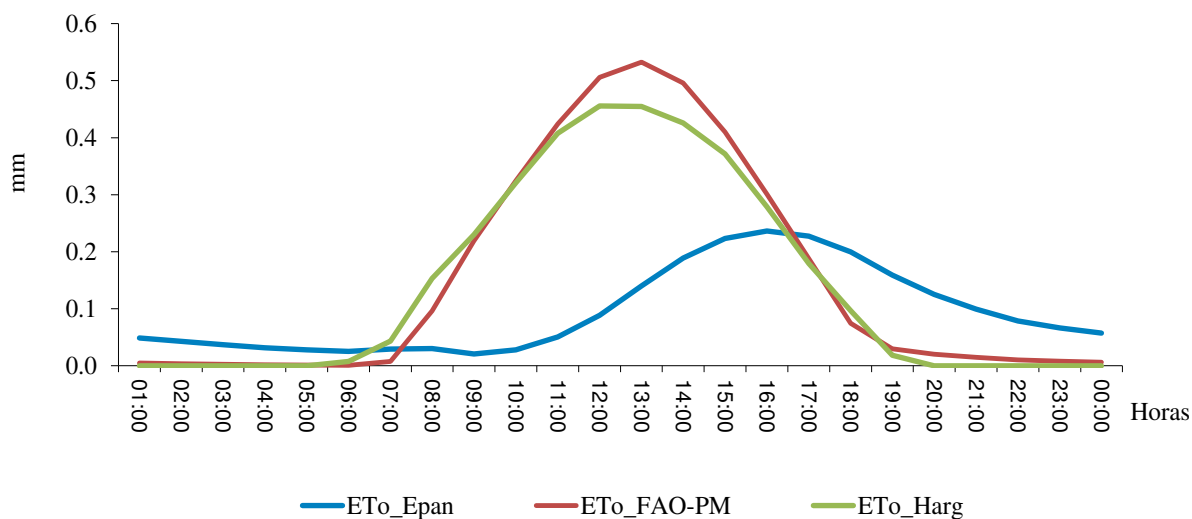
2.5. Análisis y comparación de resultados

Posteriormente a la implementación del método estándar de la FAO Penman-Monteith en la estación automática EMA Shahuindo, el autor, ha realizado un breve análisis descriptivo y comparativo de los comportamientos horarios y mensuales de los resultados ETo, obtenidos en base al método estándar FAO Penman-Monteith (ETo_FAO-PM) y los métodos opcionales del tanque de evaporación Clase A (ETo_Epan) y Hargreaves (ETo_Harg), recomendados en el estudio FAO-56, cuando se cuenta con datos climatológicos limitados.

Luego, presenta la curva de ajuste o calibración de los datos ETo para el método del tanque de evaporación con respecto al método estándar, de acuerdo a la recomendación de la FAO y finalmente un comparativo de los resultados de los tres métodos recomendados y tratados según los diagramas de cajas y bigotes (box and whiskers).

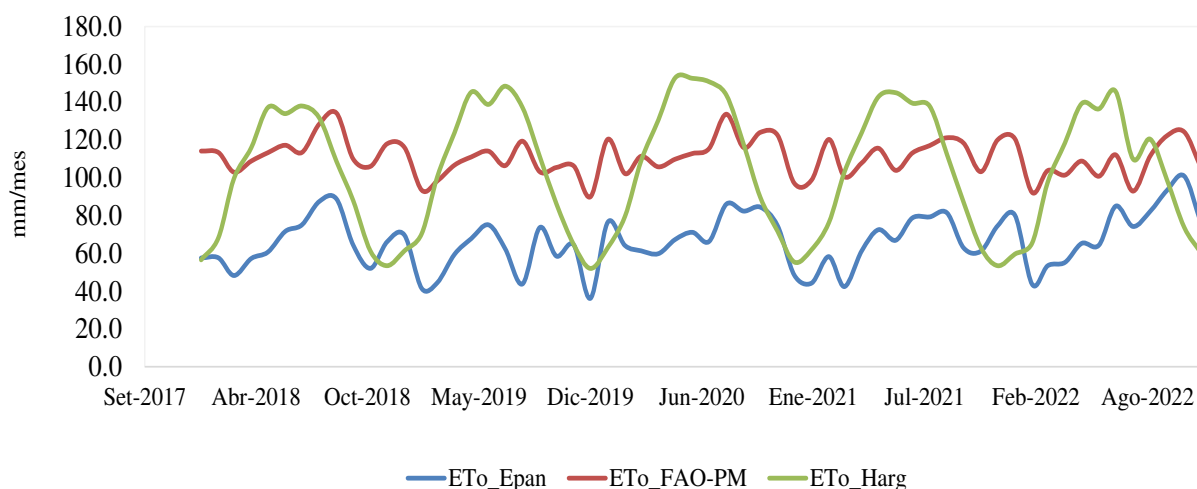
2.5.1. Comportamiento horario de la ETo – EMA Shahuindo

En el comportamiento horario multianual de los ETos determinado en base a la información horaria del periodo enero 2018 a diciembre del 2022 de la EMA Shahuindo, en la Figura 51, se observa el comportamiento similar entre los resultados de los métodos indirectos de ETo_FAO-PM y ETo_Harg, observándose que ambos alcanzan sus niveles máximos horarios entre las 12:00 horas y 13:00 horas del día, estos métodos están dominados por las variables climáticas de temperatura y radiación, en comparación al método del tanque de evaporación (ETo_Epan) que alcanza su máxima tasa de evaporación a las 16:00 horas del día, exponiendo un desfase con respecto al comportamiento de los máximos valores de temperatura y radiación solar que se presentan al mediodía. El comportamiento del tanque es debido al efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y principalmente del viento en el proceso de la evapotranspiración para superficies de agua, similar al comportamiento de los cuerpos de agua como lagos y embalses.

Figura 51*Comportamiento Horario Multianual de la ETo*

2.5.2. Comportamiento mensual de la ETo – EMA Shahuindo

En el análisis de la información mensual de la EMA Shahuindo, en la Figura 52, se aprecia que los resultados de ETo_FAO-PM y ETo_Epan sin ajuste de calibración de este último, presentan tendencias similares a lo largo del periodo de evaluación, debido a que ambos métodos integran la influencia de las variables climáticas que intervienen en el proceso de la evapotranspiración como son la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación y presión atmosférica. En el caso de los resultados ETo_Harg están basados y relacionados al comportamiento mensual de las variables de temperatura del aire y de la radiación solar (estimada), por lo tanto, los máximos mensuales pronunciados de ETo_Harg, se presentan en la época seca que corresponde a los meses de mayo a octubre y los mínimos mensuales, en la época de lluvias de octubre a marzo, donde se aprecian las temperaturas del aire moderadas y la menor radiación solar debido a la mayor presencia de nubosidad durante el día.

Figura 52*Comportamiento mensual multianual de ETo*

2.5.3. Calibración de la ETo_Epan del Tanque de Evaporación

De acuerdo a la recomendación de la FAO (2006), los valores ETo diarios obtenidos con el tanque de evaporación (Epan), se han calibrado o ajustado con una curva de regresión lineal $Y = a + b \cdot X$ (de ecuación 17), realizada tomando como referencia los valores diarios ETo_FAO-PM y considerando un 95% de confiabilidad de los datos (véase Figura 53).

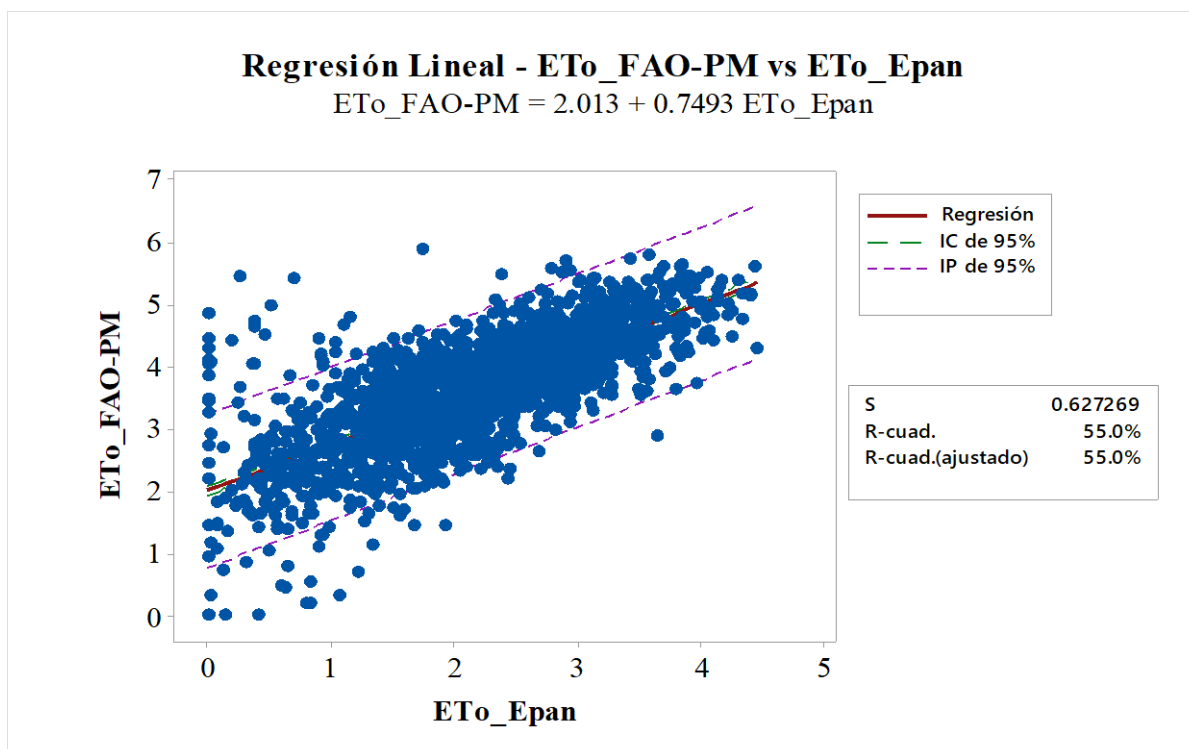
La ecuación de regresión obtenida entre los valores ETo_FAO-PM vs. ETo_Epan, es la siguiente:

$$ETo_{FAO-PM} = 2,013 + 0,7493 ETo_{Epan} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Resumen del modelo		
S	R ²	R ² (ajustado)
0,6273	55,03%	55,00%

Figura 53

Regresión lineal de la ETo_{FAO-PM} vs ETo_{Epan}



Para la calibración de los nuevos datos diarios de ETo_{Epan} , la ecuación lineal derivada considerando el intercepto ($a = 2,013$) y pendiente ($b = 0,7493$) de la ecuación 18 anterior, se presenta como:

$$ETo_{EpanCL} \approx ETo_{FAO-PM} = a + b (ETo_{Epan})$$

Donde:

ETo_{EpanCL} = evapotranspiración de referencia del tanque ajustado [$mm \text{ día}^{-1}$]

a = intercepto de la ecuación lineal ETo_{FAO-PM} vs ETo_{Epan}

b = pendiente de la ecuación lineal ETo_{FAO-PM} vs ETo_{Epan}

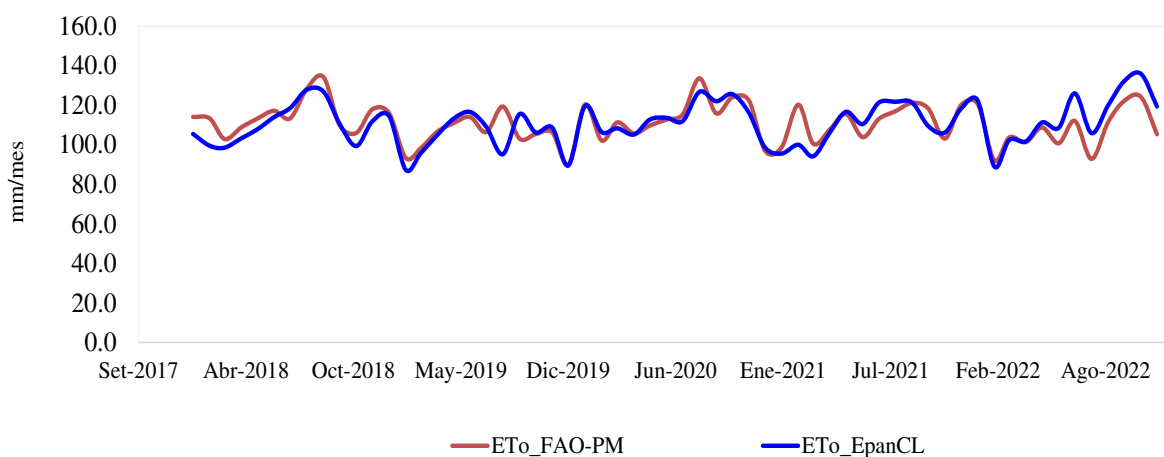
Finalmente reemplazando los valores en la ecuación los datos ajustados o calibrados del tanque de evaporación (ETo_{EpanCL}), se da por la siguiente ecuación:

$$ETo_{EpanCL} = 2,013 + 0,7493 (ETo_{Epan}) \quad (\text{Ecuación 19})$$

En la Figura 54, se muestra la variación mensual de los ETo_EpanCL obtenido del tanque de evaporación con valores ajustados con el método estándar donde se observa un comportamiento mensual y similar al ETo_FAO-PM a lo largo del periodo de evaluación 2018 a 2022.

Figura 54

Comportamiento mensual de la ETo_FAO-PM vs. ETo_EpanCL



2.5.4. Comparativo de diagrama de cajas de resultados ETo

Considerando que el estudio no pretende determinar el método más confiable, sino el grado de similitud o diferencia entre los resultados de comparación del método estándar FAO Penman-Monteith y los métodos opcionales utilizando los registros procesados de la EMA Shahuindo, se presenta en la Tabla 20, los resultados del análisis de dispersión de los datos haciendo uso de diagramas de cajas de las ETo obtenidas según el método estándar de la FAO (ETo_FAO-PM) y los métodos opcionales de Hargreaves (ETo_Harg) y del Tanque de evaporación con los valores ajustados o calibrados (ETo_EpanCL) según la ecuación 19.

Tabla 20

Resultados de diagramas de cajas de ETo – EMA Shahuindo

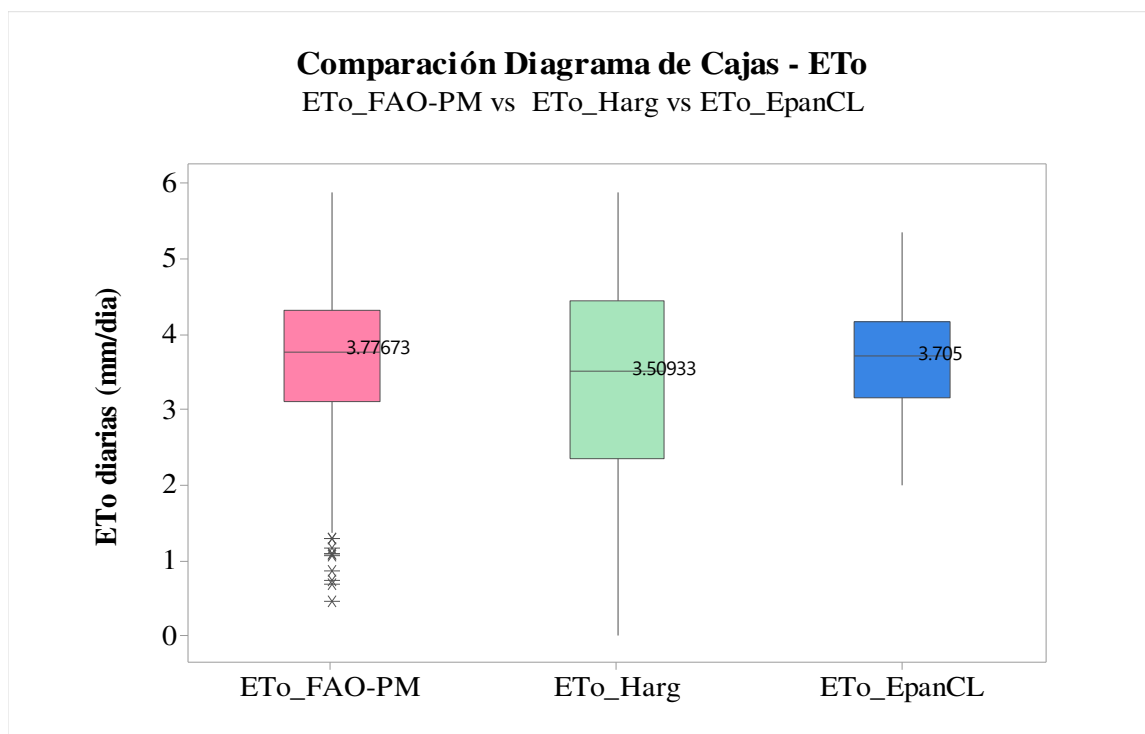
<i>Resultados Estadísticos</i>	<i>ETo_FAO-PM</i>	<i>ETo_Harg</i>	<i>ETo_EpanCL</i>
Q1 (25%)	3,11	2,34	3,16
Mediana (50%)	3,78	3,51	3,71
Q3 (75%)	4,31	4,43	4,17
Rango Intercuartil	1,21	2,09	1,01
Bigote 1	1,37	0,00	2,01
Bigote 2	5,89	5,87	5,35
Media	3,68	3,41	3,65
N° Datos	1826	1826	1826

Los resultados obtenidos de las medianas en los tres métodos, se observa que variaron entre 3,51 mm/día a 3,78 mm/día y los rangos intercuartiles (Q3-Q1) variaron entre 1,01 mm/día y 2,09 mm/día, asimismo, se presenta mayor similitud del comportamiento de distribución de datos, entre los métodos FAO Penman-Monteith y del tanque de evaporación de acuerdo a sus rangos intercuartiles (50% de los registros distribuidos en este rango), en comparación al método de Hargreaves cuyo rango intercuartil es superior debido a las pocas variables meteorológicas que intervienen en su cálculo y a la mayor dispersión de datos con respecto a su mediana.

En la Figura 55, se presenta la comparación de los diagramas de cajas ETo obtenidos.

Figura 55

Comparación de diagramas de cajas de ETo



Nota: Elaboración con registros de EMA Shahuindo con Software Minitab.

Con respecto a los valores máximos y mínimos determinado por los extremos de los bigotes de los diagramas de cajas de acuerdo a la Figura 55, los resultados ETo del tanque de evaporación, presentan menor dispersión de la información considerando que este se presenta como un valor procesado y calibrado con el método estándar de la FAO.

Los valores atípicos ETo, se presentan en el método estándar de FAO Penman-Monteith esto debido que incluye las variables horarias que provienen de las lecturas medidas de los sensores meteorológicos instalados en la EMA Shahuindo y que representa el comportamiento natural de cada uno de estos variables y como interactúan entre sí, principalmente estos valores menores a 1,37 mm/día de acuerdo al bigote inferior del diagrama de cajas, se presentaron en las épocas de lluvia debido a los periodos de precipitación pluvial donde la tasa de evaporación es mínima.

III. APORTES MÁS DESTACADOS A LA EMPRESA

El autor durante el desarrollo de sus funciones en la empresa AWS Consulting S.A.C. (AWS) ha realizado los siguientes aportes principales:

- Investigación e implementación de nuevas tecnologías en monitoreo ambiental de calidad de aire, ruido, meteorología, vibraciones y radiaciones no ionizantes, con la finalidad de ofrecer servicios de calidad, atender la demanda y tratar de satisfacer necesidades de cada cliente de AWS desde el año 2005.
- Implementación de los sistemas de telemetría de monitoreo de calidad de aire y meteorología en la UM Constancia y meteorológico en UM Shahuindo.
- Elaboración, revisión de procedimientos e instructivos y formatos de verificación que permitieron mantener un orden y control de los registros de información de las etapas de gabinete y campo de los servicios de monitoreo ambiental.
- Participación permanente en las implementaciones de los sistemas gestión de calidad, seguridad ocupacional y homologaciones de AWS.
- Mejoramiento en la elaboración y tiempos de entrega de informes de monitoreo ambiental trimestrales de los clientes a las autoridades competentes como Ministerio del Ambiente y Sectores competentes, con la creación y capacitación en plantillas a personal involucrado.
- Coordinación y participación con el área administrativa en el planeamiento de los proyectos desde la jefatura de calidad de aire, lo que permitía un mayor control y supervisión de las otras áreas, resolviendo cualquier consulta técnica u observación al desarrollo y mejoramiento de los proyectos.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo al desarrollo de este trabajo, el autor, expone las principales conclusiones:

- Se realizó de acuerdo al objetivo principal, la implementación del método estándar FAO Penman-Monteith (ETo_FAO-PM) en una estación meteorológica automática (EMA Shahuindo) para la determinación horaria de la evapotranspiración de referencia (ETo) según la guía N°56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO (2006), con la finalidad proponer el método estándar frente a los variados métodos indirectos que estiman la evapotranspiración y donde no sea posible instalar un tanque de evaporación Clase A debido a factores como inaccesibilidad y mantenimientos periódicos requeridos para la operación del tanque.
- Se realizó la evaluación del área de estudio donde se encuentra ubicada la EMA Shahuindo y también se realizó la evaluación meteorológica realizada de los registros horarios procesados de la EMA Shahuindo del periodo de enero 2018 a diciembre 2022, la temperatura ambiental promedio en la zona de evaluación fue de 15,0°C, la humedad relativa ambiental promedio fue de 67,7%, la radiación neta promedio fue de 126,5 W/m², la presión atmosférica promedio fue de 719,2 hPa, la precipitación presentó un promedio acumulado anual de 1047,3 mm presentándose de acuerdo a las tendencias mensuales la mayor precipitación entre los meses de octubre a marzo, la evapotranspiración de referencia (ETo_Epan) según el método del tanque de evaporación en promedio fue de 796,2 mm presentando la mayor tasa de evaporación entre los meses de mayo a setiembre, la velocidad del viento promedio fue de 2,0 m/s considerada como brisa muy débil de acuerdo a la escala de Beaufort y la dirección del viento predominante (de donde proviene) de acuerdo a la rosa de vientos fue del Norte (N).
- Se ha descrito como parte de la metodología de implementación de la ETo, los criterios técnicos de instalación de una EMA de acuerdo a las guías y protocolo nacional e internacional de instalación de EMAs, la instrumentación, softwares, desarrollo y programación del método estándar ETo en lenguaje Basic, asimismo se han identificado los parámetros

meteorológicos requeridos como son velocidad del viento a 2 m ($\mu 2$), temperatura del aire (T), humedad relativa (HR), presión atmosférica (P) y la radiación neta (Rn) medidos directamente por la EMA para la determinación horaria de la ETo FAO Penman-Monteith según la FAO.

- En los resultados de comparación de los métodos recomendados por la FAO para determinar la ETo y en el análisis de los resultados a nivel horario, los métodos de FAO Penman-Monteith y Hargreaves presentan comportamiento similar y alcanzan sus máximos al medio día, en comparación a la tasa de evaporación del tanque Clase A, que alcanza su máxima tasa de evaporación a las 16:00 horas similar al comportamiento de la evaporación que ocurre en superficies de agua libre como lagos y embalses, de otro lado, el tanque de evaporación con datos ajustados (ETo_EpanCL) y el método estándar de FAO Penman-Monteith presentan comportamiento y dispersión similares en la evapotranspiración diaria y mensual.

V. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en ubicaciones remotas de instalación de una EMA, donde no sea posible contar con la logística de mantener un tanque de evaporación Clase A, en la etapa de planificación considerar las características técnicas similares de los componentes de la EMA descritas en el presente informe, asimismo seguir las recomendaciones de las guías de la OMM, US EPA y protocolo nacional para realizar la implementación del método estándar de FAO Penman-Monteith para la determinación horaria de la ETo según la FAO-56.

- Con respecto a la información meteorológica de la EMA Shahuindo se recomienda seguir manteniendo activa y supervisada la mencionada estación, con la finalidad de ampliar su registro histórico que permita continuar con la evaluación del comportamiento horario y mensual de las variables meteorológicas con la finalidad de calibrar sus modelos de pronósticos.

- De acuerdo a la metodología descrita en el presente informe para la implementación del método estándar de la ETo (FAO-56) y con la finalidad de estandarizar los criterios para medir adecuadamente los parámetros meteorológicos en una EMA, se recomienda:

- Considerar y aplicar las recomendaciones y criterios técnicos establecidos en las guías de la OMM N°08, US EPA y protocolo nacional de SENAMHI y sus respectivas actualizaciones para instalación de EMA.
- El registrador de datos (datalogger) considerado el componente esencial de toda EMA, se debe adquirir de similar o de mejores características descritas en este trabajo, que permita realizar la programación de la ecuación estándar para determinar la ETo o adquirir en el futuro registradores que realicen el reporte a nivel horario del método estándar según la FAO-56.
- Se debe considerar en la etapa de planificación de instalación de una EMA, los costos de adquisición, instalación y post-mantenimiento de la estación, siendo

básicamente su aplicación actual considerando su costo-beneficio para estudios detallados como estaciones principales terrestres para calibración de modelos de pronósticos que requieren información detallada y del lugar de medición.

- Considerando que la EMA cuenta con componentes electrónicos y en algunos casos son sensibles, los procedimientos de instalación, mantenimientos, reemplazo de repuestos y calibración, deben realizarse por personal entrenado y/o calificado en instalación y operación de estaciones automáticas, con la finalidad que la EMA tenga un funcionamiento continuo y óptimo.

- En estaciones meteorológicas donde no se exista disponibilidad de contar con todos los parámetros que permiten determinar la ETo según el método estándar FAO Penman-Monteith para el registro y análisis de los datos a nivel horario y/o mensual, se recomienda aplicar las metodologías descritas en el estudio de la FAO-56 con respecto a cómo obtener y/o determinar los datos faltantes o por el contrario determinar la ETo aplicando los métodos opcionales recomendados por la FAO como son el método del Hargreaves y del tanque de evaporación Clase A. En la implementación de estaciones con tanque de evaporación Clase A como un método de menor presupuesto que un sistema meteorológico completo y automatizado, se deben considerar sus presupuestos de supervisión de los tanques de evaporación e implementación de cilindro reservorio de agua (600 litros o más) o costos de compra y traslado de agua, capacitación de personal y seguir las recomendaciones de los fabricantes.

VI. REFERENCIAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Smith M. (1998). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y drenaje N.º 56. <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- AWS Consulting S.A.C. [AWS]. (2023). *Nosotros*. Web de AWS. <https://www.awsperu.com/aws-monitoreo-ambiental-nosotros/>
- Campbell Scientific Inc. [Campbell]. (2012). *Manual VisualWeather™ Software*. (Versión 3.1.3) [software]. Revisión: 6/12. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/vweather.pdf>
- Campbell Scientific Inc. [Campbell]. (2018). *Operator's Manual: CR1000 Datalogger*. Revision: 02/2018. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>
- Campbell Scientific Inc. [Campbell]. (2021). *Short Cut*. (Version 4.4) [software]. update: 03-16-2021. <https://www.campbellsci.com/shortcut>
- Campbell Scientific Inc. [Campbell]. (2022). *CRBasic Editor*. (Version 3.9) [software]. update: 04-11-2022. <https://www.campbellsci.com/crbasiceditor>
- Campbell Scientific Inc. [Campbell]. (2023). *Product Manual: CR1000X Measurement and Control Datalogger*. Revision: 06/2023. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000x-product-manual.pdf>
- Hargreaves G., Samani Z. (1985). Evapotranspiración de cultivo de referencia a partir de la temperatura. *Ingeniería Aplicada en Agricultura*, 1(2), 96-99. (doi: 10.13031/2013.26773)

Ministerio de Agricultura y Alimentación. [MINAG]. (1978). *Diagnóstico de los valles Cajamarca y Condebamba*. Plan Mejoramiento de Riego en la Sierra (PLAN MERIS). <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1620>

Organismo de la Evaluación y Fiscalización Ambiental. [OEFA]. (2018a). *Evaluación ambiental temprana en el área de influencia de la Unidad Minera Shahuindo de Shahuindo S.A.C. en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca durante el 2017 y 2018 (27 de Setiembre 2018)*. (Informe N°290-2018-OEFA/DEAM-STEC). <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/110>

Organismo de la Evaluación y Fiscalización Ambiental. [OEFA]. (2018b). *Evaluación ambiental de suelos, tejido vegetal, flora y fauna como parte de la Evaluación Ambiental Temprana en el área de influencia de la Unidad Minera Shahuindo, de la minera Shahuindo S.A.C. y zonas aledañas (31 diciembre 2018)*. (Informe N°381-2018-OEFA/DEAM-STEC). <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/350>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [FAO]. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje N°56 (FAO-56). (ed.español). pp. 1-86. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional*. OMM N° 182. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3664

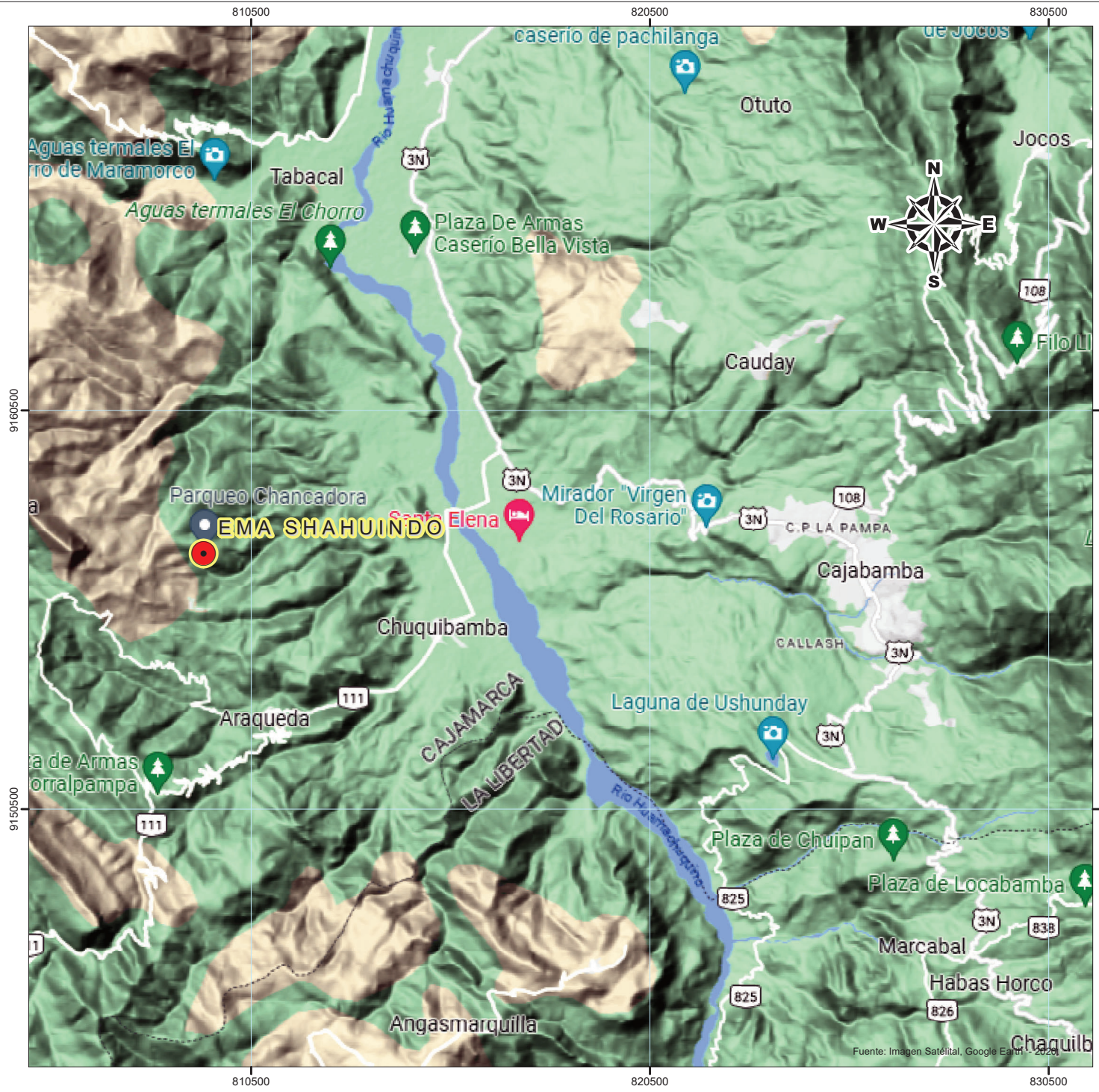
Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (2017). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos N° 8*. OMM N°8. (ed. 2017). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3664

- Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (2020). *Guía de Prácticas Hidrológicas Vol. I: Hidrología – De la Medición a la Información Hidrológica*. OMM N°168. (ed. 2020).
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10456
- Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (2021). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación. Volumen I –Medición de Variables Meteorológicas* (OMM N°8-Vol. I). (ed. 2020).
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11628
- Rosell, C. (1993). *Irrigación - Libro 14 Colección del Ingeniero Civil*. Capítulo de Ingeniería Civil - Colegio de Ingenieros del Perú (p.45).
- Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles. [SENACE]. (2020). *Evaluación del Sexto Informe Técnico Sustentatorio (ITS) de la Unidad Minera Shahuindo, presentado por Shahuindo S.A.C.* (Informe N°43-2020-SENACE-PE/DEAR). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/505503/inf-DEAR-43-2020-RD-18.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. [SENAMHI]. (2013). *Protocolo para la Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas*.
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-instalacion-operacion-estaciones-meteorologicas>
- U.S. Environmental Protection Agency. [US EPA]. (2008). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume IV: Meteorological Measurements*. EPA-454/B-08-002. (Version 2.0). https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/volume_iv_meteorological_measurements.pdf

VII. ANEXOS

ANEXO A

MAPA DE UBICACIÓN - EMA SHAHUINDO

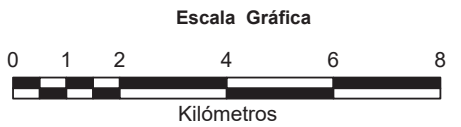


Fuente Cartografica: IGN, MTC

ESTACIÓN	COORDENAS UTM - DATUM WGS84 (Zona 17M)		
	ESTE (m)	NORTE (m)	Altitud (m.s.n.m.)
EMA SHAHUINDO	809304.24	9156912.22	2915

LEYENDA:

- EMA Shahuindo



Título:
MAPA DE UBICACIÓN
ESTACIÓN METEOROLÓGICA SHAHUINDO
 DEPARTAMENTO CAJAMARCA - PROVINCIA CAJABAMBA
 DISTRITO DE CACHACHI

Escala: 1:100 000	Diseño: JCB	ANEXO N°
Fecha: ABRIL 2023	Revisión: JCB	A

Fuente: Imagen Satelital, Google Earth 2020

ANEXO B

**RESUMEN DE REGISTROS METEOROLÓGICOS MENSUALES (2018 -2022)
EMA SHAHUINDO**

Resumen Mensual Temperatura del Aire (T, °C) - EMA SHAHUINDO

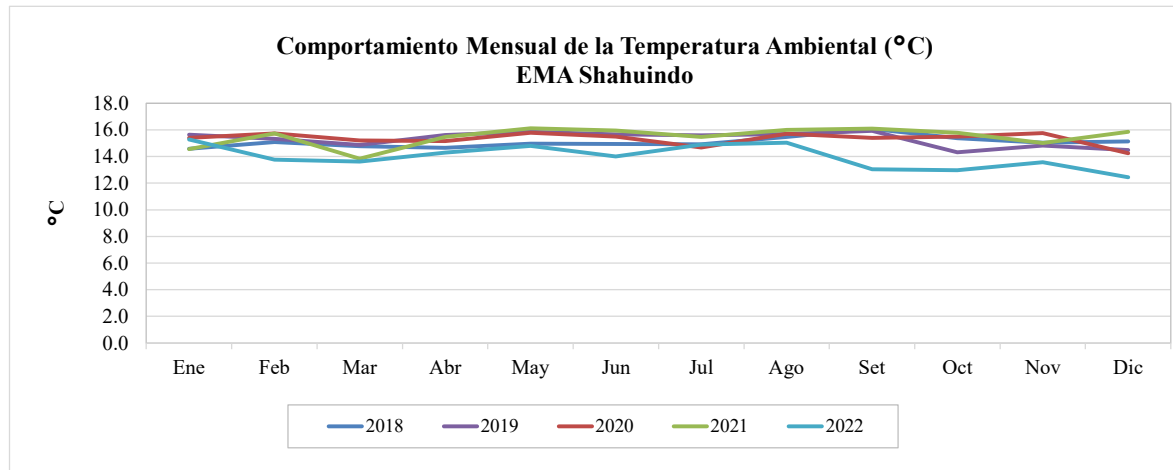
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Temperatura del Aire:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	14.57	15.08	14.77	14.65	14.96	14.94	14.91	15.47	16.06	15.38	15.04	15.12	15.08
2019	15.64	15.32	14.87	15.61	15.85	15.66	15.58	15.68	15.92	14.31	14.82	14.49	15.31
2020	15.39	15.72	15.21	15.15	15.79	15.50	14.68	15.70	15.40	15.50	15.75	14.25	15.34
2021	14.55	15.73	13.82	15.46	16.10	15.94	15.46	15.99	16.10	15.78	15.02	15.84	15.48
2022	15.27	13.75	13.61	14.29	14.80	14.01	14.89	15.05	13.05	12.97	13.58	12.44	13.98
Promedio	15.08	15.12	14.46	15.03	15.50	15.21	15.11	15.58	15.30	14.79	14.84	14.43	
Desviación_Estandar	0.50	0.82	0.70	0.55	0.58	0.76	0.39	0.35	1.29	1.16	0.79	1.27	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

TA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	7.41	7.07	6.44	8.72	7.17	6.78	6.89	6.37	7.13	6.67	6.56	6.49	6.37
Promedio	15.08	15.12	14.46	15.03	15.50	15.21	15.11	15.58	15.30	14.79	14.84	14.43	15.04
Máximo_horario	26.72	26.51	25.47	24.46	25.50	25.31	25.74	26.68	26.46	27.13	27.70	27.71	27.71



Resumen Mensual Humedad Relativa Ambiental (HR, %) - EMA SHAHUINDO

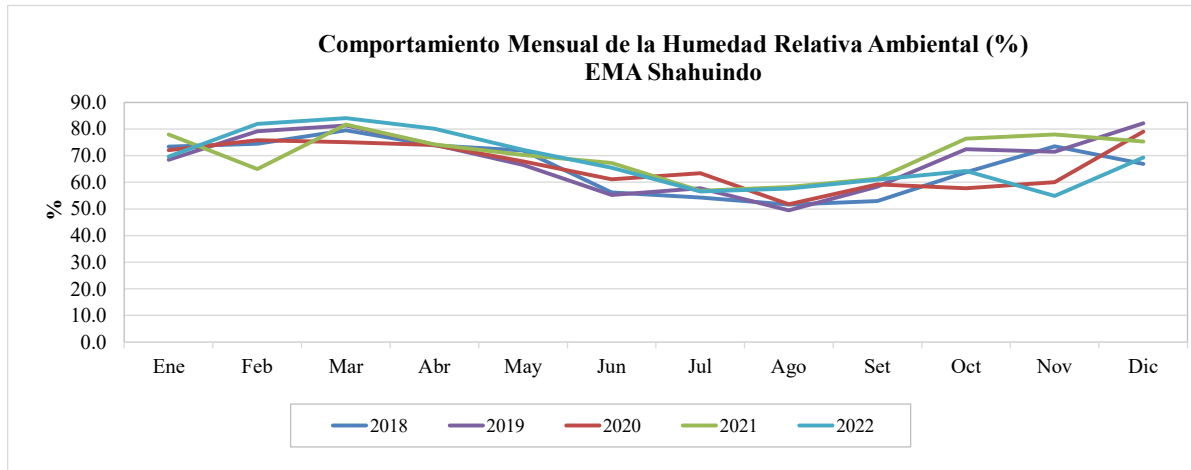
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Humedad Relativa Ambiental:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	73.43	74.44	79.46	73.85	71.91	56.14	54.28	51.60	52.98	63.82	73.44	66.91	66.02
2019	68.40	79.15	81.25	74.05	66.55	55.25	57.79	49.52	58.36	72.39	71.42	82.15	68.02
2020	72.04	75.78	75.05	73.98	67.89	61.17	63.44	51.78	59.23	57.80	60.00	79.01	66.43
2021	77.90	64.91	81.68	74.18	70.26	67.24	56.80	58.21	61.32	76.41	77.92	75.28	70.18
2022	69.64	81.91	84.09	80.10	72.19	65.44	56.56	57.62	60.98	64.24	54.84	69.26	68.07
Promedio	72.28	75.24	80.31	75.23	69.76	61.05	57.77	53.75	58.57	66.93	67.53	74.52	
Desviación_Estandar	3.71	6.47	3.37	2.72	2.48	5.37	3.42	3.91	3.36	7.41	9.69	6.41	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

HR	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	21.98	16.09	25.60	29.24	15.18	17.50	14.17	14.37	6.44	16.20	8.09	9.07	6.44
Promedio	72.28	75.24	80.31	75.23	69.76	61.05	57.77	53.75	58.57	66.93	67.53	74.52	67.74
Máximo_horario	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Resumen Mensual Radiación Neta (Rn, W/m²) - EMA SHAHUINDO

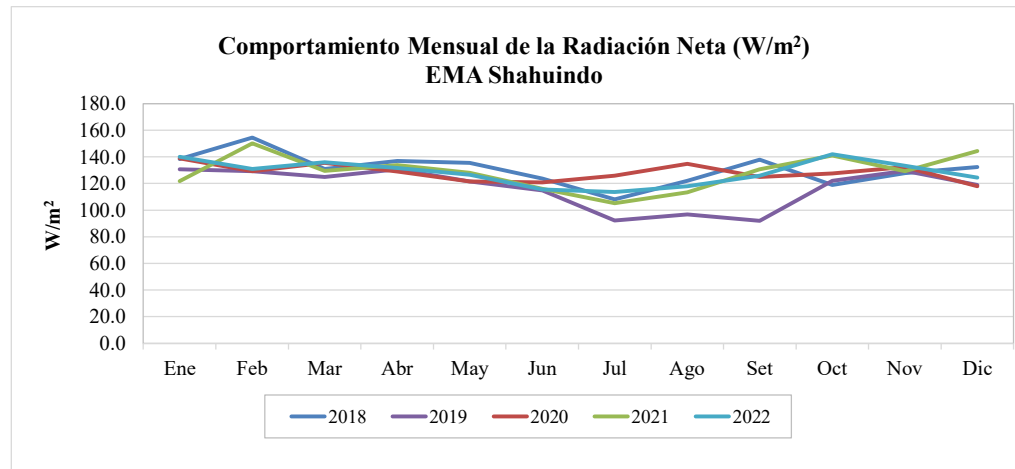
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Radiación Neta:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	138.32	154.53	130.89	136.92	135.37	123.58	107.97	121.95	137.78	118.82	127.82	132.33	130.52
2019	130.63	129.14	124.81	130.57	121.41	114.89	92.22	96.69	92.04	121.94	129.39	118.90	116.89
2020	138.89	129.22	135.44	129.01	121.58	120.92	125.75	134.85	124.92	127.49	132.36	117.85	128.19
2021	121.80	150.07	129.42	133.79	127.94	115.89	105.13	113.42	130.60	141.07	129.22	144.32	128.56
2022	139.93	131.01	135.84	131.61	126.58	115.57	113.51	117.87	125.85	141.84	133.21	124.43	128.10
Promedio	133.91	138.80	131.28	132.38	126.58	118.17	108.92	116.95	122.24	130.23	130.40	127.57	
Desviación_Estandar	7.71	12.45	4.57	3.07	5.72	3.86	12.23	13.87	17.63	10.71	2.28	10.99	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

Rn	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	-160.40	-81.90	-66.23	-78.61	-77.17	-84.20	-91.50	-91.00	-332.30	-229.90	-98.60	-245.00	-332.30
Promedio	133.91	138.80	131.28	132.38	126.58	118.17	108.92	116.95	122.24	130.23	130.40	127.57	126.45
Máximo_horario	1210.00	1240.00	1278.00	1249.00	1128.00	1012.00	968.00	950.00	1176.00	1282.00	1210.00	1319.00	1319.00



Resumen Mensual Presión Atmosférica (P, hPa) - EMA SHAHUINDO

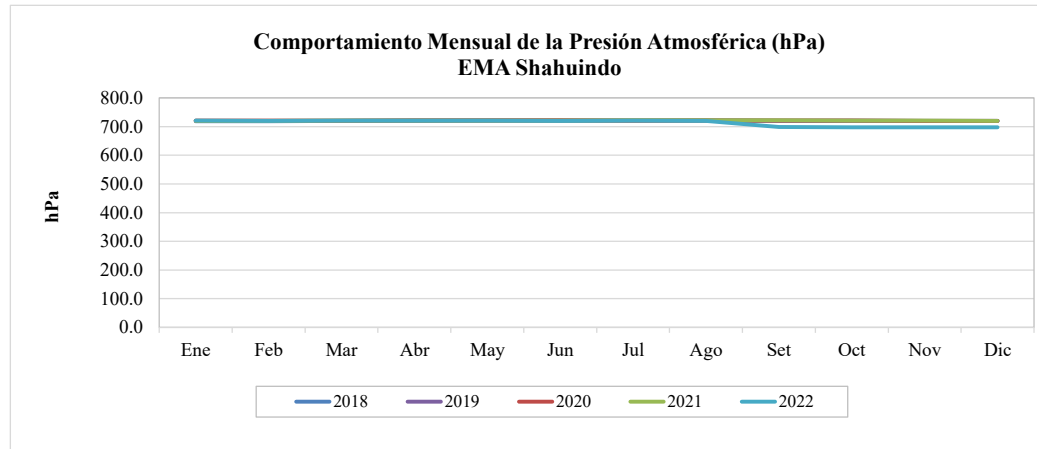
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Presión Atmosférica:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	719.14	719.49	719.63	720.55	720.86	721.01	720.84	720.92	719.88	719.85	719.60	719.93	720.14
2019	720.06	720.07	720.47	720.69	720.69	721.23	721.42	721.92	721.54	720.93	720.36	720.60	720.83
2020	721.07	721.10	721.34	722.13	722.29	721.80	721.36	721.32	721.30	720.67	720.11	719.93	721.20
2021	719.56	720.37	720.67	720.71	721.04	721.19	721.89	721.99	721.81	721.29	720.62	720.43	720.96
2022	720.67	720.46	720.69	720.86	720.93	720.58	720.70	720.50	698.57	698.13	697.82	697.30	713.10
Promedio	720.10	720.30	720.56	720.99	721.16	721.16	721.24	721.33	716.62	716.17	715.70	715.64	
Desviación_Estandar	0.79	0.59	0.61	0.65	0.64	0.44	0.48	0.64	10.12	10.10	10.00	10.26	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

PB	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	713.88	715.32	715.52	716.49	716.89	716.95	716.78	716.22	694.51	694.08	692.31	693.07	692.31
Promedio	720.10	720.30	720.56	720.99	721.16	721.16	721.24	721.33	716.62	716.17	715.70	715.64	719.25
Máximo_horario	726.17	724.65	725.26	725.04	725.36	725.84	725.31	726.45	726.21	725.28	724.13	724.26	726.45



Resumen Mensual Velocidad del Viento a 10 metros (μZ, m/s) - EMA SHAHUINDO

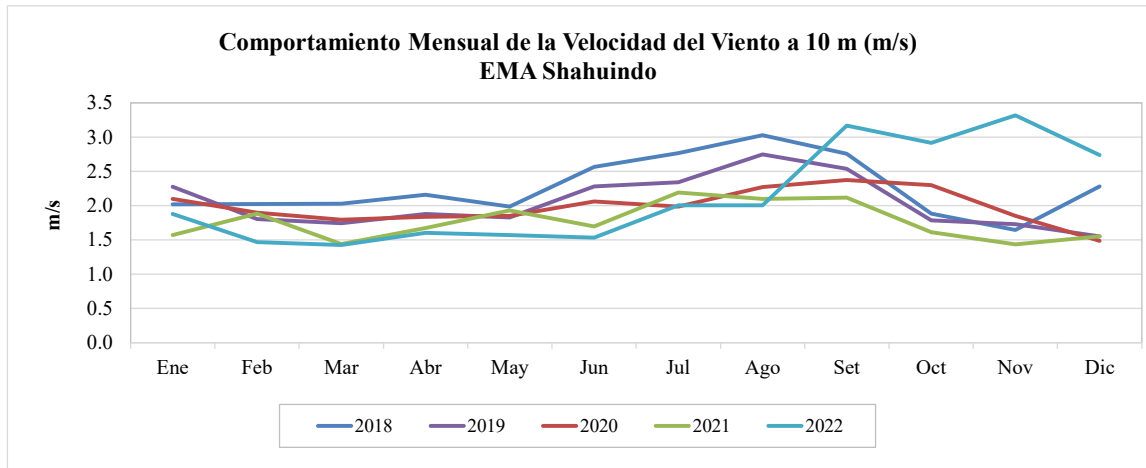
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Velocidad del Viento:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	2.02	2.02	2.03	2.16	1.98	2.57	2.77	3.03	2.76	1.88	1.64	2.28	2.26
2019	2.28	1.80	1.74	1.88	1.82	2.28	2.34	2.75	2.53	1.78	1.73	1.55	2.04
2020	2.10	1.89	1.80	1.84	1.85	2.06	1.98	2.27	2.37	2.30	1.85	1.48	1.98
2021	1.57	1.88	1.44	1.67	1.93	1.70	2.19	2.10	2.12	1.61	1.43	1.55	1.76
2022	1.88	1.47	1.42	1.60	1.57	1.53	2.00	2.00	3.17	2.91	3.31	2.74	2.13
Promedio	1.97	1.81	1.68	1.83	1.83	2.03	2.26	2.43	2.59	2.10	1.99	1.92	
Desviación_Estandar	0.27	0.21	0.26	0.22	0.16	0.42	0.32	0.44	0.40	0.52	0.75	0.56	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

μz, 10m	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedio	1.97	1.81	1.68	1.83	1.83	2.03	2.26	2.43	2.59	2.10	1.99	1.92	2.04
Máximo_horario	17.44	19.99	17.74	15.48	16.07	14.41	13.43	15.88	17.15	20.19	19.80	16.86	20.19



Resumen Mensual de la Dirección del Viento (WD, °) Grados Sexagesimales) - EMA SHAHUINDO

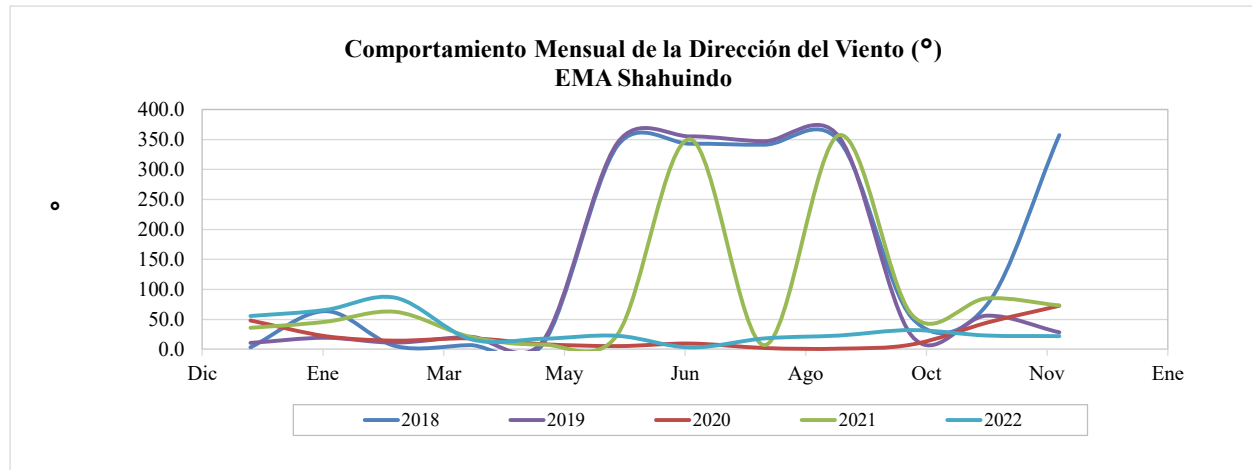
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Dirección del Viento:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio Vectorial
2018	3.58	63.86	5.39	6.90	8.00	338.93	342.81	341.40	347.19	53.11	73.90	357.34	10.28
2019	10.56	19.24	11.26	21.00	13.28	344.19	355.08	347.20	353.78	22.58	56.13	28.24	11.68
2020	48.19	22.14	14.59	18.56	8.68	5.60	9.55	2.28	1.10	7.98	44.31	72.78	20.69
2021	36.17	45.82	62.47	20.91	7.94	24.21	350.48	6.88	357.56	57.61	84.86	73.40	33.76
2022	55.74	65.80	86.16	17.40	17.67	22.77	3.25	18.20	23.28	32.32	23.28	22.30	31.61
Promedio	30.93	43.41	34.93	16.96	11.11	3.18	356.24	359.19	0.49	34.75	56.61	38.77	21.60
Desviación_Estandar	22.93	22.15	36.14	5.83	4.28	177.64	187.97	183.69	186.79	20.80	24.29	139.89	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

WD	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	0.03	0.01	0.11	0.01	0.01	0.05	0.04	0.03	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01
Promedio	30.93	43.41	34.93	16.96	11.11	3.18	356.24	359.19	0.49	34.75	56.61	38.77	21.60
Máximo_horario	359.58	359.61	358.84	358.99	359.03	359.67	359.33	358.70	359.20	359.72	358.96	359.88	359.88



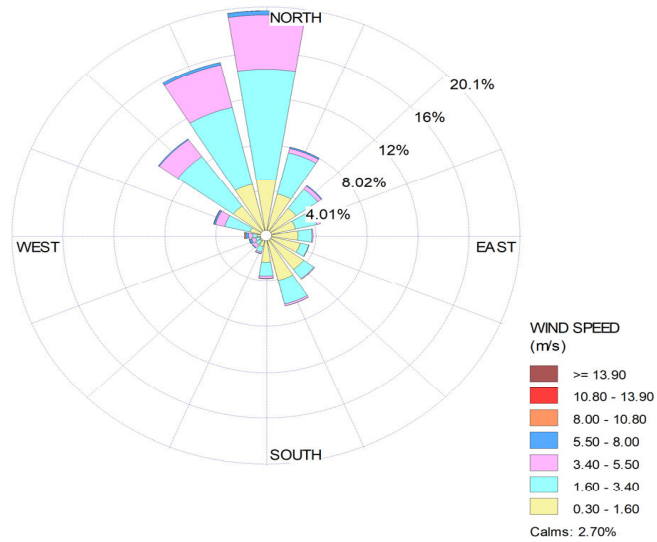
Rosa de Viento Predominante 2018 a 2022 - EMA SHAHUINDO

Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

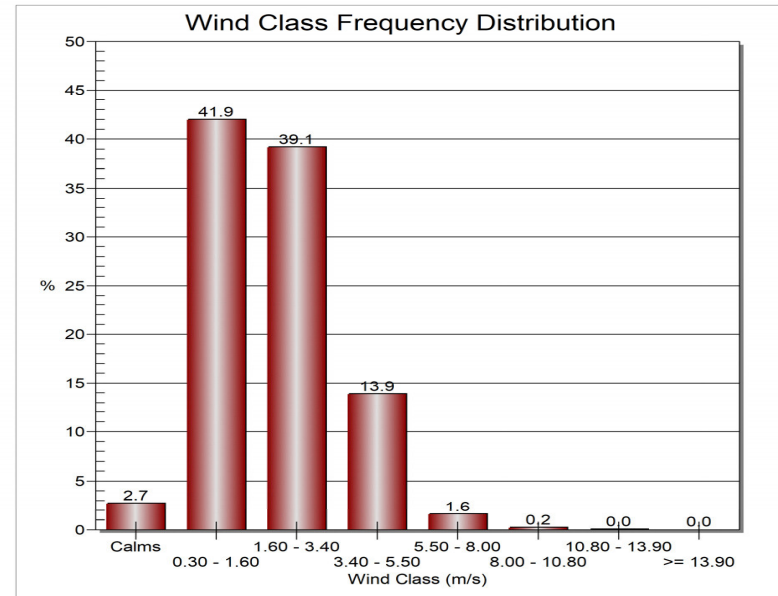
Resumen Mensual - Dirección del Viento (WD, (°) Grados Sexagesimales)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
2018	3.58	63.86	5.39	6.90	8.00	338.93	342.81	341.40	347.19	53.11	73.90	357.34	10.28
2019	10.56	19.24	11.26	21.00	13.28	344.19	355.08	347.20	353.78	22.58	56.13	28.24	11.68
2020	48.19	22.14	14.59	18.56	8.68	5.60	9.55	2.28	1.10	7.98	44.31	72.78	20.69
2021	36.17	45.82	62.47	20.91	7.94	24.21	350.48	6.88	357.56	57.61	84.86	73.40	33.76
2022	55.74	65.80	86.16	17.40	17.67	22.77	3.25	18.20	23.28	32.32	23.28	22.30	31.61
Promedio	30.93	43.41	34.93	16.96	11.11	3.18	356.24	359.19	0.49	34.75	56.61	38.77	21.60
Desviación_Estandar	22.93	22.15	36.14	5.83	4.28	177.64	187.97	183.69	186.79	20.80	24.29	139.89	

ROSA DE VIENTO 2018 - 2022



DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - 2018 a 2022



Rosa de Viento Predominante 2018 a 2022 - EMA SHAHUINDO

Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

TABLA DE FRECUENCIAS EN PORCENTAJE POR RANGO DE VELOCIDADES

WRPLOT View Freeware 8.0.2

File Edit Tools Help

Display: Wind Speed Stability Class

Wind Directions: 16 Wind Classes [7]...

Units: Knots m/s

Orientation: Direction (blowing from) Flow Vector (blowing to)

Met Data Information Frequency Count Frequency Distribution **Wind Rose** Graph

Home Dates: 1/01/2018 - 00:00 ... 31/12/2022 - 23:00 % On

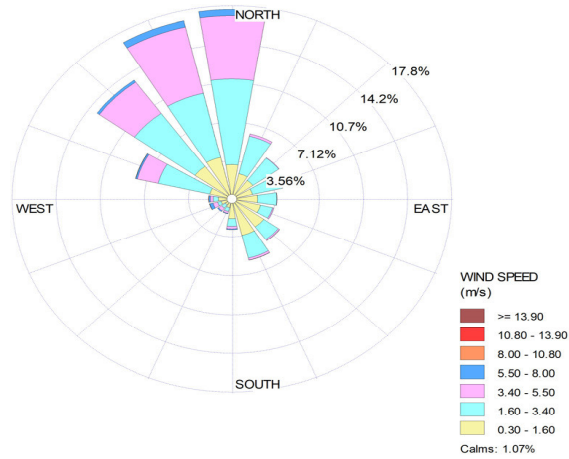
	Directions / Wind Classes (m/s)	0.30 - 1.60	1.60 - 3.40	3.40 - 5.50	5.50 - 8.00	8.00 - 10.80	10.80 - 13.90	>= 13.90	Total (%)
1	N	4.95836	9.60639	4.73702	0.35596	0.01141	0.00000	0.00000	19.669100
2	NNE	3.78779	3.74216	0.37650	0.12322	0.00685	0.00000	0.00000	8.03651
3	NE	2.98460	2.08100	0.33999	0.07530	0.00228	0.00000	0.00000	5.48317
4	ENE	2.45066	1.68853	0.31717	0.00685	0.00000	0.00000	0.00000	4.46321
5	E	2.57387	1.09527	0.08899	0.00228	0.00000	0.00000	0.00000	3.76041
6	ESE	2.83172	0.68226	0.02966	0.00228	0.00000	0.00000	0.00000	3.54592
7	SE	3.71249	0.99258	0.07074	0.00685	0.00000	0.00000	0.00000	4.78266
8	SSE	4.08899	2.16315	0.17342	0.01369	0.00228	0.00000	0.00000	6.44153
9	S	2.38677	1.19566	0.20993	0.02738	0.00000	0.00000	0.00000	3.81974
10	SSW	1.03137	0.49287	0.13691	0.02966	0.00000	0.00000	0.00000	1.69082
11	SW	0.63662	0.40160	0.31489	0.05705	0.00228	0.00228	0.00000	1.41472
12	WSW	0.55448	0.32630	0.34455	0.18254	0.01597	0.00228	0.00000	1.42613
13	W	0.73474	0.35596	0.33999	0.21449	0.10268	0.00456	0.00000	1.75242
14	WNW	1.32116	2.06503	0.74615	0.13234	0.03195	0.00000	0.00000	4.29663
15	NW	3.22191	5.39418	1.80034	0.08899	0.00000	0.00000	0.00000	10.505400
16	NNW	4.67313	6.86138	3.82658	0.23731	0.00228	0.00000	0.00000	15.600700
	Sub-Total	41.948700	39.144300	13.852800	1.55619	0.17798	0.00913	0.00000	96.689100
	Calms								2.70394
	Missing/Incomplete								0.60696
	Total								100.00

Rosas de Viento Predominante Anuales - EMA SHAHUINDO

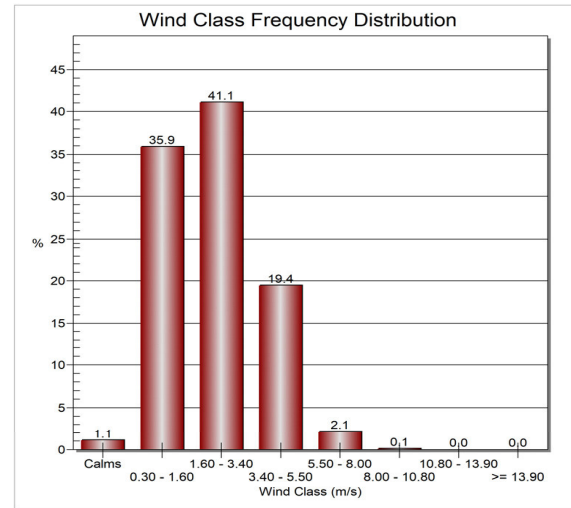
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Rosas de Viento Predominante por Año:

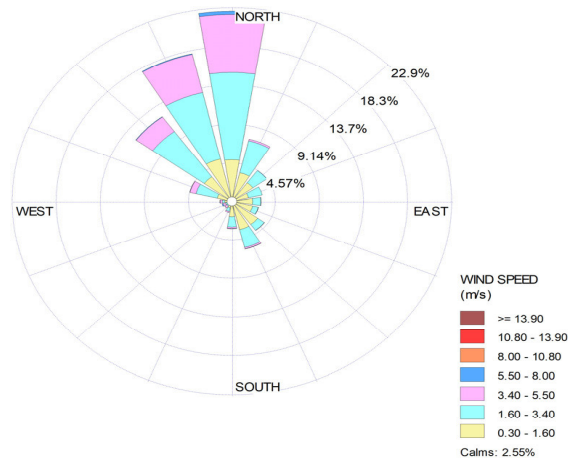
ROSA DE VIENTO - AÑO 2018



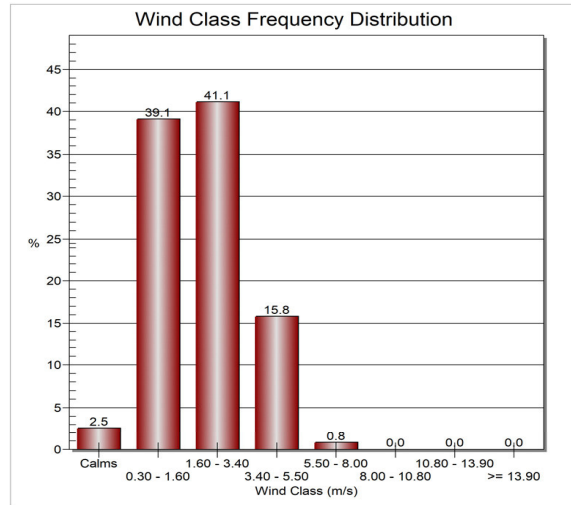
DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - AÑO 2018



ROSA DE VIENTO - AÑO 2019



DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - AÑO 2019

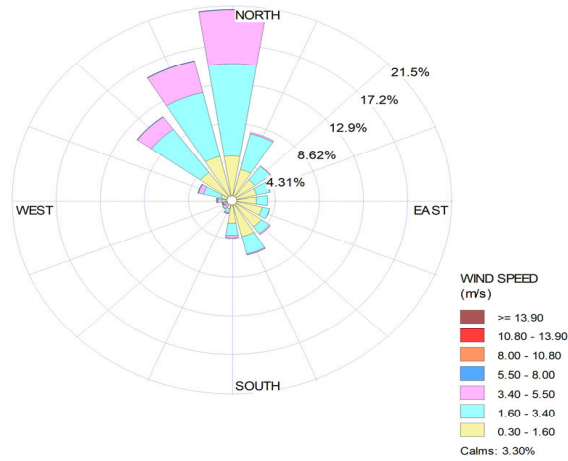


Rosas de Viento Predominante Anuales - EMA SHAHUINDO

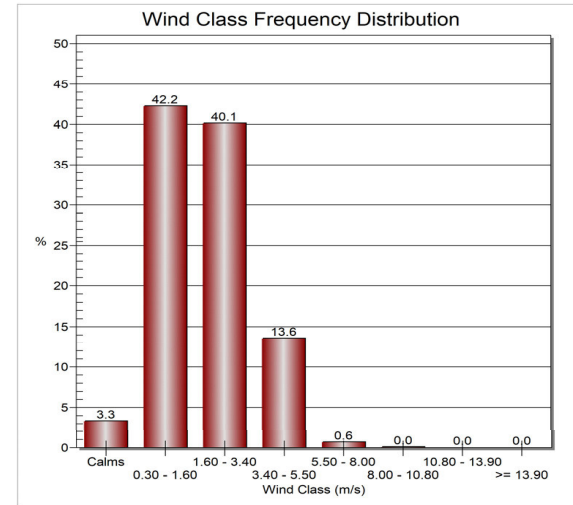
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo: 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Rosas de Viento Predominante por Año:

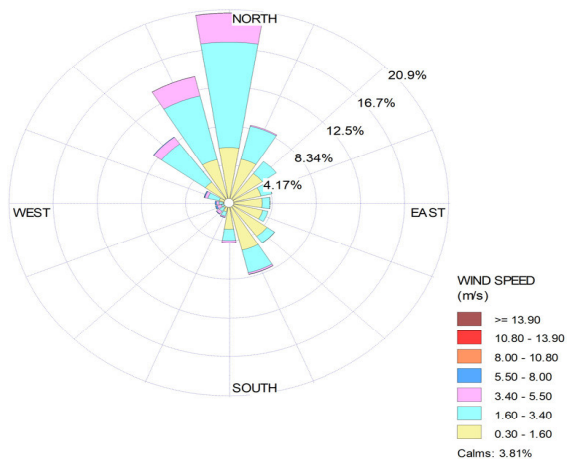
ROSA DE VIENTO - AÑO 2020



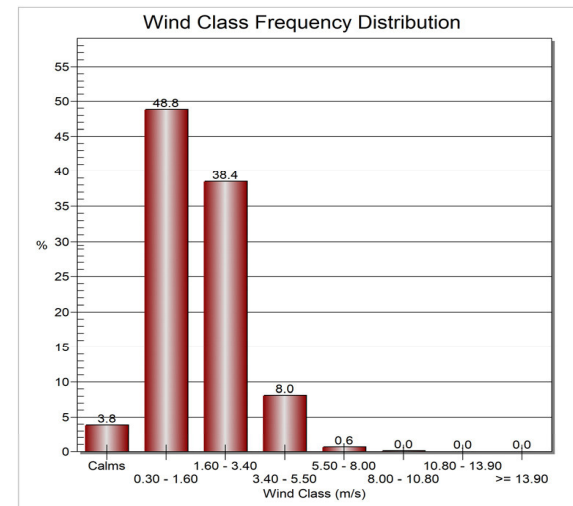
DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - AÑO 2020



ROSA DE VIENTO - AÑO 2021



DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - AÑO 2021

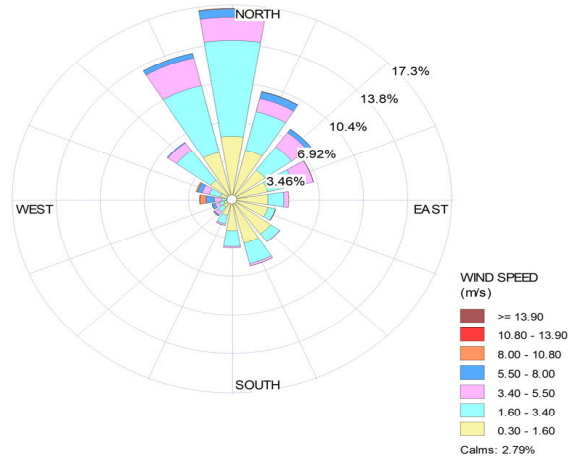


Rosas de Viento Predominante Anuales - EMA SHAHUINDO

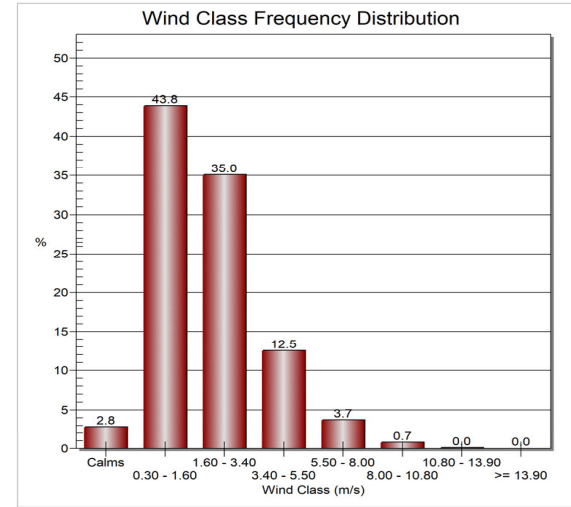
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo: 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Rosas de Viento Predominante por Año:

ROSA DE VIENTO - AÑO 2022



DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO - AÑO 2022



Resumen Mensual de la Precipitación (Pp, mm) - EMA SHAHUINDO

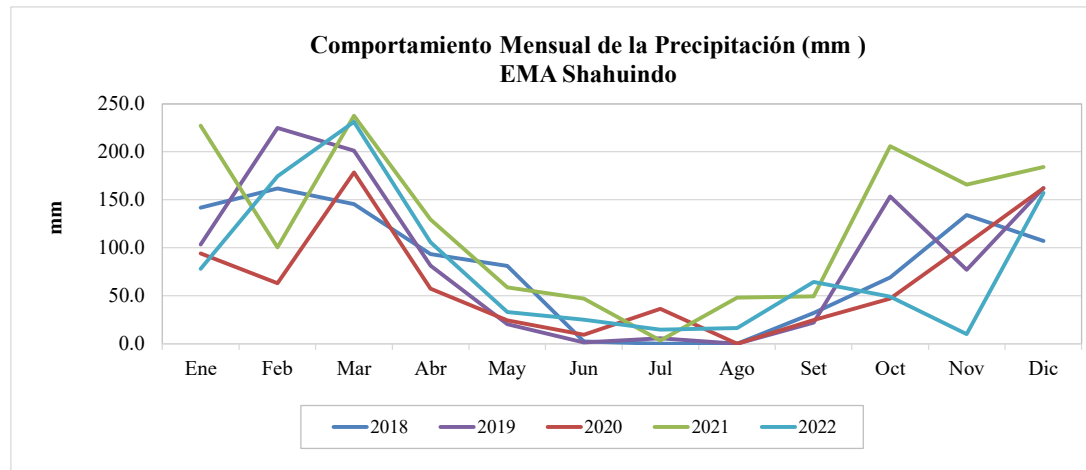
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales de Precipitación:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	TOTAL (mm)
2018	141.74	161.79	145.54	93.21	81.03	2.29	0.00	0.00	32.00	69.09	134.13	107.08	967.90
2019	103.48	224.79	201.32	81.38	20.22	1.37	5.59	0.00	21.84	153.50	77.00	162.20	1052.69
2020	94.00	63.00	178.60	57.30	24.40	9.40	36.40	0.00	24.60	47.10	104.00	162.10	800.90
2021	227.10	100.20	237.60	129.30	58.70	47.10	3.30	48.00	49.30	205.70	165.70	184.10	1456.10
2022	78.10	174.50	231.30	105.60	32.90	25.10	14.70	16.20	64.30	49.10	10.00	157.20	959.00
Promedio	128.88	144.86	198.87	93.36	43.45	17.05	12.00	12.84	38.41	104.90	98.17	154.54	
Desviación_Estandar	59.69	63.74	38.12	26.86	25.78	19.30	14.69	20.87	17.99	71.17	59.39	28.50	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

Pp	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedio	128.88	144.86	198.87	93.36	43.45	17.05	12.00	12.84	38.41	104.90	98.17	154.54	87.28
Máximo_horario	24.50	22.28	24.70	20.90	18.50	9.60	4.60	6.30	22.20	21.00	17.20	24.80	24.80



Resumen Mensual Evapotranspiración de Referencia con el Tanque Clase A (ETo_Epan, mm) - EMA SHAHUINDO

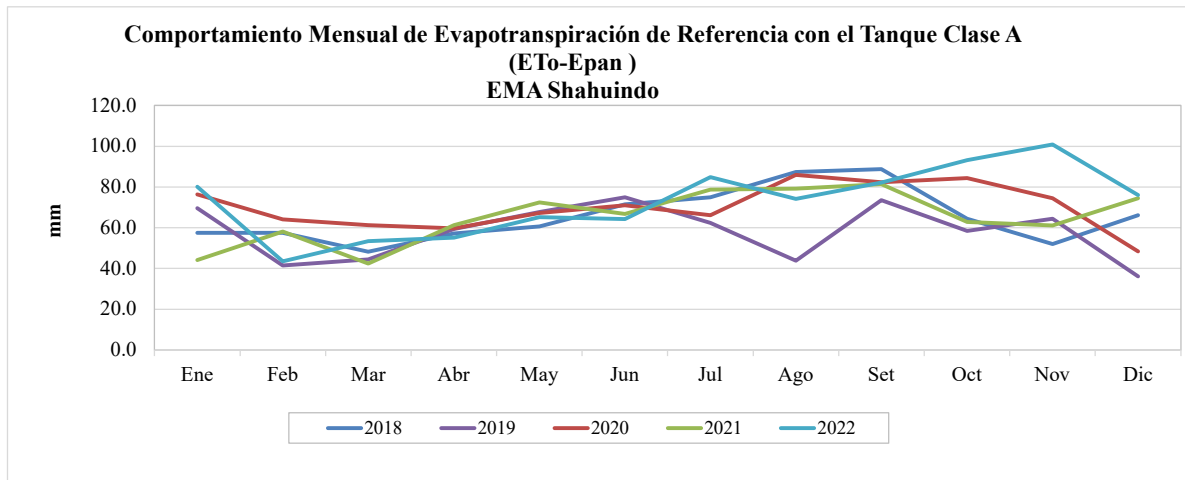
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo: 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales - ETo_Epan

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	TOTAL (mm)
2018	57.50	57.58	48.21	57.21	60.64	71.55	75.03	87.36	88.77	64.36	52.00	66.09	786.30
2019	69.63	41.40	44.39	59.45	67.74	75.02	62.33	43.76	73.59	58.47	64.41	36.14	696.33
2020	76.39	64.09	61.28	59.78	67.26	71.07	66.23	85.99	82.31	84.40	74.55	48.42	841.77
2021	44.20	58.21	42.36	61.23	72.45	66.86	78.68	79.23	81.41	62.83	61.14	74.50	783.10
2022	80.19	43.56	53.39	55.18	65.23	64.29	84.93	74.18	82.19	93.24	100.85	76.05	873.28
Promedio	65.58	52.97	49.93	58.57	66.66	69.76	73.44	74.10	81.65	72.66	70.59	60.24	
Desviación_Estandar	14.74	9.93	7.61	2.38	4.28	4.21	9.18	17.78	5.40	15.23	18.74	17.38	

Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

ETo epan	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedio	65.58	52.97	49.93	58.57	66.66	69.76	73.44	74.10	81.65	72.66	70.59	60.24	66.35
Máximo_horario	1.28	1.17	1.24	1.42	1.44	0.43	0.45	0.47	0.84	0.90	0.70	0.81	1.44



Resumen Mensual - Evapotranspiración de Referencia FAO Penman-Monteith (ET_o_FAO-PM, mm)

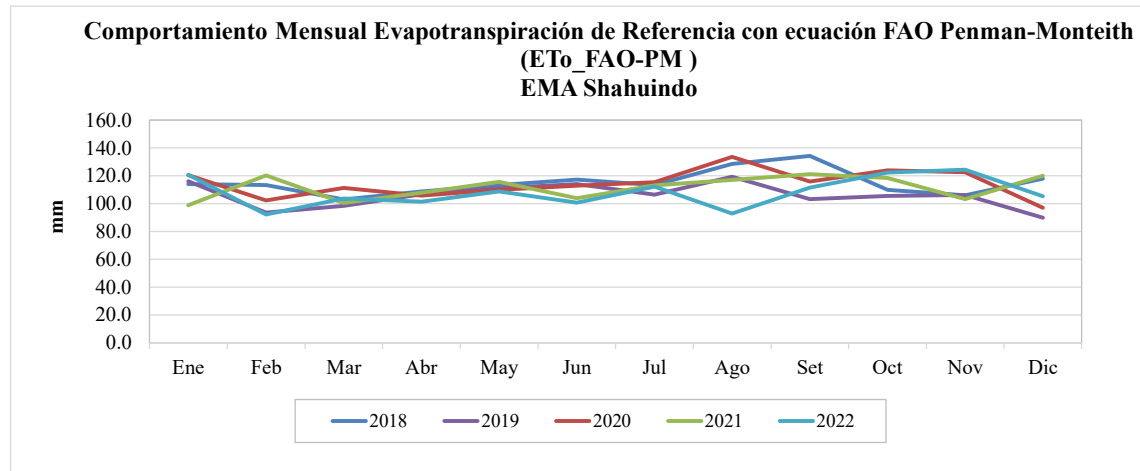
Estación : EMA Shahuindo
 Coordenadas: Este 808622 Norte 9157490 (Datum WGS-84) Alt.: 2915 msnm
 Departamento: Cajamarca Provincia: Cajabamba Distrito: Cachachi
 Periodo 01-Ene-2018 a 31-Dic-2022
 Analista de Datos: J. Caycho B.

Registros Mensuales - ET_o FAO Penman-Monteith:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	TOTAL (mm)
2018	114.10	113.36	102.91	108.80	113.26	117.17	113.38	128.39	134.23	109.90	105.98	117.96	1379.44
2019	116.07	93.44	98.27	106.68	110.97	114.03	106.40	119.33	103.15	105.41	106.22	89.90	1269.87
2020	120.34	102.18	111.34	105.75	109.79	112.79	115.42	133.61	115.95	124.00	122.48	97.07	1370.70
2021	98.74	120.26	100.54	107.80	115.58	103.88	113.09	116.99	121.14	118.32	103.17	120.02	1339.54
2022	120.66	92.19	103.77	101.39	108.80	100.77	112.08	92.90	111.50	122.20	124.25	105.35	1295.84
Promedio	113.98	104.28	103.37	106.08	111.68	109.73	112.07	118.24	117.19	115.97	112.42	106.06	
Desviación_Estandar	8.97	12.31	4.95	2.87	2.74	7.03	3.40	15.69	11.59	8.02	10.08	13.03	

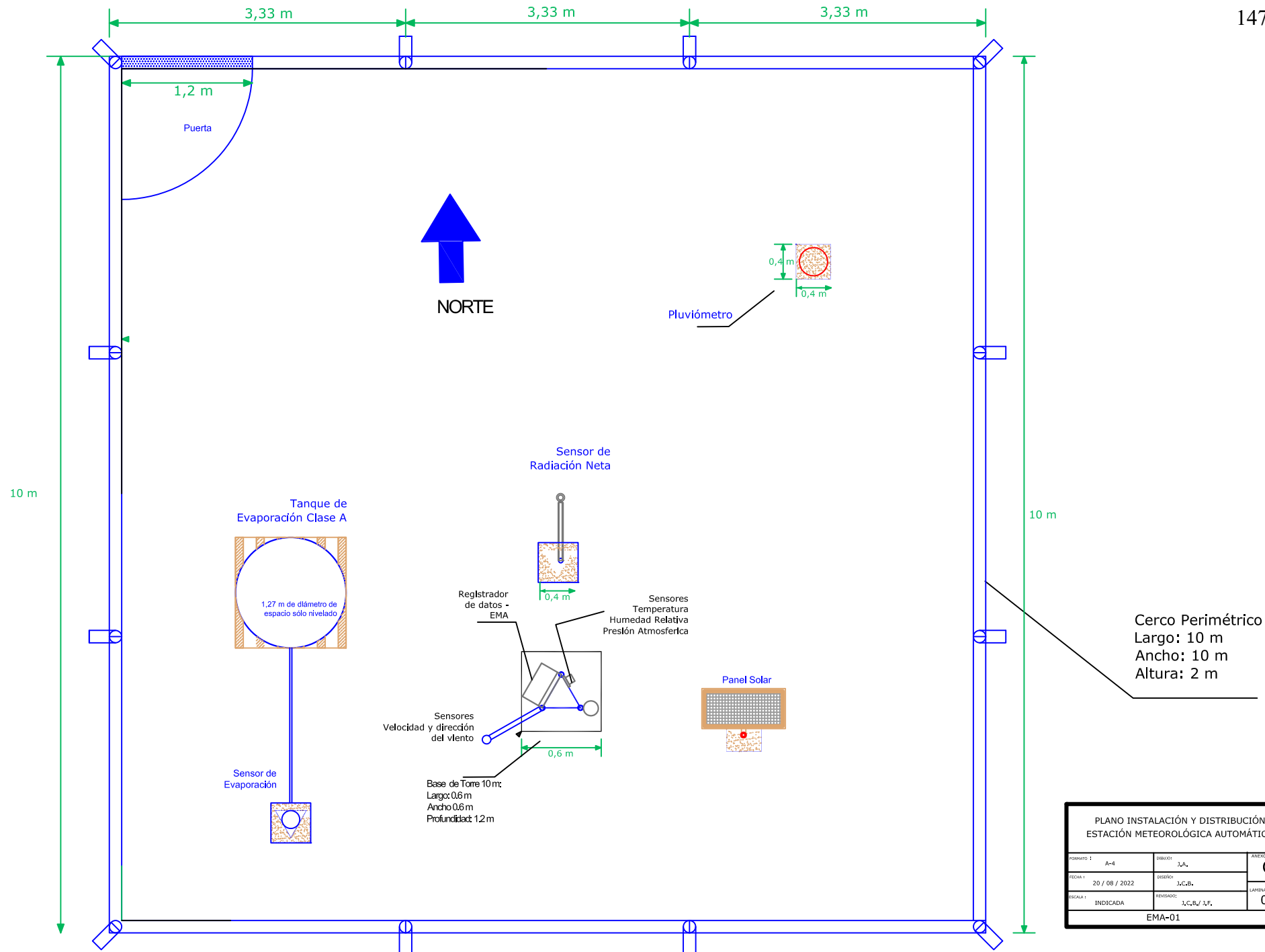
Resumen del periodo meteorologico - Años 2018 - 2022

ET _o FAO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Resultados
Mínimo_Horario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedio	113.98	104.28	103.37	106.08	111.68	109.73	112.07	118.24	117.19	115.97	112.42	106.06	110.92
Máximo_horario	0.80	0.82	0.81	0.78	0.70	0.69	0.65	0.66	0.78	0.84	0.80	0.77	0.84

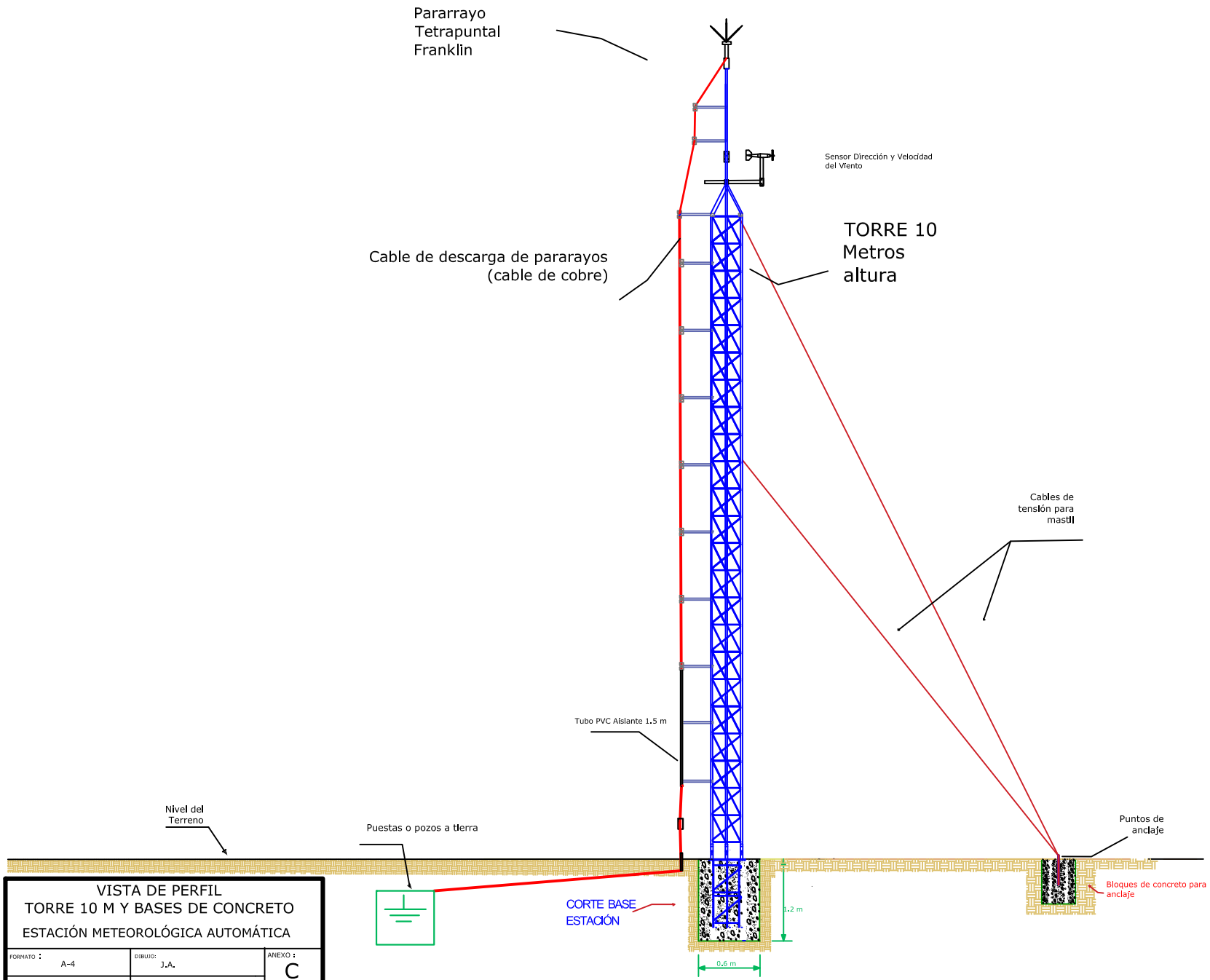


ANEXO C

**PLANOS DE INSTALACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES
DE UNA EMA**



PLANO INSTALACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA			
FORMATO: A-4	DIBUJO: J.A.	ANEXO: C	
FECHA: 20 / 08 / 2022	DISEÑO: J.C.B.	LÁMINA: 01	
ESCALA: INDICADA	REVISADO: J.C.B./ J.F.	EMA-01	



VISTA DE PERFIL
TORRE 10 M Y BASES DE CONCRETO
ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA

FORMATO : A-4	DIBUJO: J.A.	ANEXO : C
FECHA : 20 / 08 / 2022	DISEÑO: J.C.B.	LAMINA : 02
ESCALA : INDICADA	REVISADO: J.C.B./ J.F.	

EMA-01

ANEXO D**PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN DEL MÉTODO ESTANDAR ET₀
EN REGISTRADOR DATOS PARA UNA EMA**

```
1  'Datalogger CR1000 _ Estacion Meteorologica Automatica
2  'Programa creado por Bach.Ing. Juan J. Caycho Bustamante - Actualizado 2023.
3
4
5  StationName (EMA-01)
6
7  'Declare Variables and Units
8
9  Public BattV
10 Public PTemp_C
11 Public WS
12 Public WS_Raf_ms
13 Public WS_Raf_KPH
14 Public WD
15 Public AT
16 Public RHum
17 Public BP
18 Public Evap
19 Public Rain
20 Public NRad
21 Public NRad_mv
22 Public NRad_cws
23
24 'Variables Public - ETo
25 Public ETo, EToc
26
27 'Variables Dim
28 Dim CorrFact
29 Dim WD_hr As String
30 Dim WD_Day As String
31
32 Dim LastFileName1 As String * 35
33 Dim LastFileName2 As String * 35
34 Dim OutStat1
35 Dim OutStat2
36
37 'Variables dim - ETo
38 Dim RN_MJ, Ghr, Y, U2, Thr, Psv, Ssvpt, ea
39
40 'Unidades de las variables
41 Units BattV=Vdc
42 Units PTemp_C=Deg_C
43 Units WS=m/s
44 Units WS_Raf_ms=m/s
45 Units WS_Raf_KPH=KPH
46 Units WD=Deg_S
47 Units AT=Deg_C
48 Units RHum=%
49 Units BP=hPa
50 Units Evap=mm
51 Units Rain=mm
52 Units NRad=W/m2
53 Units NRad_cws=W/m2
54 Units Eto=mm
55 Units Etoc=mm
56
```

```

57
58
59 'TABLAS DE DATOS (REGISTROS):
60
61 'Tabla de Variables ETo - Horarios
62 DataTable (Cal_01, True, 1500)
63   TableHide
64     DataInterval (0, 60, Min, 10)
65     WindVector (1, WS, WD, FP2, False, 0, 0, 3)
66     FieldNames ("WindDir")
67     Average (1, WS, IEEE4, False)
68     Average (1, NRad_cws, IEEE4, False)
69     Average (1, BP, IEEE4, False)
70     Minimum (1, AT, IEEE4, False, False)
71     Average (1, AT, IEEE4, False)
72     Maximum (1, AT, IEEE4, False, False)
73     Minimum (1, RHum, IEEE4, False, False)
74     Average (1, RHum, IEEE4, False)
75     Maximum (1, RHum, IEEE4, False, False)
76 EndTable
77 'Tabla de Registros Horarios
78 DataTable (MET_HORARIO, True, 1500)
79   DataInterval (0, 60, Min, 10)
80   TableFile ("USB:MET_HORARIO_", 8, -1, 0, -1, min, OutStat1, LastFileName1)
81   Average (1, BattV, FP2, False)
82   Minimum (1, WS, FP2, False, True)
83   WindVector (1, WS, WD, FP2, False, 0, 0, 0)
84   FieldNames ("WSpeed, WindDir, Sigma-Theta")
85   Sample (1, WD_hr, String)
86   FieldNames ("WDir_Siglas")
87   Maximum (1, WS, FP2, False, True)
88   Minimum (1, AT, FP2, False, True)
89   Average (1, AT, FP2, False)
90   Maximum (1, AT, FP2, False, True)
91   Minimum (1, RHum, FP2, False, True)
92   Average (1, RHum, FP2, False)
93   Maximum (1, RHum, FP2, False, True)
94   Minimum (1, BP, IEEE4, False, True)
95   Average (1, BP, IEEE4, False)
96   Maximum (1, BP, IEEE4, False, True)
97   Totalize (1, Rain, FP2, False)
98   Average (1, NRad, FP2, False)
99   Minimum (1, NRad_cws, FP2, False, True)
100  Average (1, NRad_cws, FP2, False)
101  Maximum (1, NRad_cws, FP2, False, True)
102  Minimum (1, Evap, FP2, False, False)
103  Sample (1, Evap, FP2)
104    Maximum (1, Evap, FP2, False, False)
105  Maximum (1, WS_Raf_ms, FP2, False, False)
106  FieldNames ("WS_Rafaga")
107  Maximum (1, WS_Raf_KPH, FP2, False, False)
108  FieldNames ("WS_Rafaga_KPH")
109  Sample (1, Eto, IEEE4)
110  Sample (1, Etoc, IEEE4)
111 EndTable
112

```

```

113
114
115
116 'Tabla de Registros diarios
117
118 DataTable(MET_DIARIO, True, 130)
119   DataInterval(0, 1440, Min, 10)
120   TableFile ("USB:MET_DIARIO_", 8, -1, 0, -1, Min, OutStat2, LastFileName2)
121   Average(1, BattV, FP2, False)
122   Minimum(1, WS, FP2, False, True)
123   WindVector (1, WS, WD, FP2, False, 0, 0, 0)
124   FieldNames ("WSpeed, WindDir, Sigma-Theta")
125   Sample (1, WD_Day, String)
126   FieldNames ("WDir_Siglas")
127   Maximum(1, WS, FP2, False, True)
128   Minimum(1, AT, FP2, False, True)
129   Average(1, AT, FP2, False)
130   Maximum(1, AT, FP2, False, True)
131   Minimum(1, RHum, FP2, False, True)
132   Average(1, RHum, FP2, False)
133   Maximum(1, RHum, FP2, False, True)
134   Minimum(1, BP, IEEE4, False, True)
135   Average(1, BP, FP2, False)
136   Maximum(1, BP, IEEE4, False, True)
137   Totalize(1, Rain, FP2, False)
138   Average(1, NRad, FP2, False)
139   Minimum(1, NRad_cws, FP2, False, True)
140   Average(1, NRad_cws, FP2, False)
141   Maximum(1, NRad_cws, FP2, False, True)
142   Maximum (1, WS_Raf_ms, FP2, False, False)
143   FieldNames ("WS_Rafaga")
144   Maximum (1, WS_Raf_KPH, FP2, False, False)
145   FieldNames ("WS_Rafaga_KPH")
146 EndTable
147
148
149 'PROGRAMA PRINCIPAL:
150 BeginProg
151
152 'Constante - ETo
153 Const ZWs = 10.0 'altura del WS
154
155 'MAIN SCAN
156 Scan(1, Sec, 2, 0)
157
158   'Default Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
159   Battery(BattV)
160
161
162   'Default Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C'
163   PanelTemp(PTemp_C, _60Hz)
164
165
166
167
168

```

```

169
170
171   'CONFIGURACION SENSORES METEOROLOGICOS
172
173   '05103 Wind Speed & Direction Sensor measurements WS and WD:
174   PulseCount(WS,1,1,1,1,0.098,0)
175   AvgRun (WS_Raf_ms,1,WS,3)
176   WS_Raf_KPH=WS_Raf_ms*3.6
177
178   BrHalf(WD,1,mV2500,3,1,1,2500,True,0,_60Hz,355,0)
179   If WD<=0 OR WD>=360 OR WD=NAN Then WD=0.0
180
181
182
183   '41382VC Temperature & Relative Humidity Sensor measurements
184   VoltSe(AT,1,mV2500,15,0,0,_60Hz,0.1,-50.00)
185   VoltSe(RHum,1,mV2500,16,0,0,_60Hz,0.1,0.0)
186   If (RHum>100) AND (RHum<108) Then RHum=100
187   If (RHum<0) Then RHum=0
188
189   'PTB-110 Barometric Pressure Sensor measurement 'BP_mbar'
190   PortSet(1,1)
191   VoltSe(BP,1,mV2500,1,1,0,_60Hz,0.240,500.0)
192
193   'MetOne 380/382 Rain Gauge measurement Pp_mm:
194   PulseCount(Rain,1,2,2,0,0.1,0)
195
196   'Q-7.1 Net Radiometer measurements 'NRad' and 'NRadC__Wm2'
197   VoltDiff(NRad_mv,1,mV250,5,True,0,_60Hz,1,0)
198   If NRad_mv>=0 Then
199     CorrFact=1+(0.066*0.2*WS)/(0.066+(0.2*WS))
200     NRad=NRad_mv*8.77
201   Else
202     CorrFact=(0.00174*WS)+0.99755
203     NRad=NRad_mv*10.79
204   EndIf
205   NRad_cws=NRad*CorrFact
206
207   '255-100 Generic Half Bridge measurements 'Evap'
208   BrHalf(Evap,1,mV2500,8,3,1,2500,True,0,_60Hz,239.88,0.0)
209   If (Evap<0) Then Evap=0
210
211   'CALCULOS
212   'Call Data Tables and Store Data
213
214
215   CallTable(Cal_01)
216
217
218
219
220
221
222
223
224

```

```

225
226
227 '#####
228 'Eto hourly - FAO Penman-Monteith (FAO-56)
229 'Calculation with the Net Radiation - created for Bach. Ing. Juan Caycho B.:
230
231 'RN_Mj=W/m2 *0.0036 - Net radiation (Rn)
232 RN_MJ= (Cal_01.NRad_cws_avg(1,1))*0.0036
233
234 'Ghr =Mj/m2 - Ground heat flux density (G)
235 If RN_MJ>0 Then
236     Ghr=RN_MJ*0.1
237 Else
238     Ghr=RN_MJ*0.5
239 EndIf
240
241 'Y=Kpa/c - Psychrometric Constant
242 Y =(Cal_01.BP_avg(1,1))*0.1*(0.665/1000)
243
244 'U2=m/s - Wind speed at 2 meters
245 U2=(Cal_01.WS_avg(1,1))*(4.87/(LN(67.8*(ZWs)-5.42)))
246
247 'Thr=deg C - Temp average hourly
248 Thr= Cal_01.AT_avg(1,1)
249
250 'Psv=kPa - Saturation Vapor Pressure at air temperature
251 Psv=(0.6108*EXP(17.27*Thr/(Thr+237.3)))
252
253 'ea=Kpa - Real Saturation Pressure
254 ea=(Psv*Cal_01.RHum_avg(1,1)/100)
255
256 'Ssvpt=Kpa/c Slope of the Saturation Vapor Pressure - Temperature
257 Ssvpt=(4098*(0.6108*EXP((17.27*Thr)/(Thr+237.3)))/(Thr+237.3)^2
258
259
260
261 'Eto - Reference Evapotranspiration Calculation Hourly (ETo_FAO-PM):
262 ETo=(0.408*Ssvpt*(RN_MJ-Ghr)+Y*(37/(Thr+273))*U2*(Psv-ea))/(Ssvpt+Y*(1+(0.34*U2)
263
264 'Sequence to remove negative values from ETo and save the new value as EToc:
265 Etoc=Eto
266 If Etoc<0.0 Then Etoc=0.0
267
268 'End of program for ETo.
269
270 '#####
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280

```

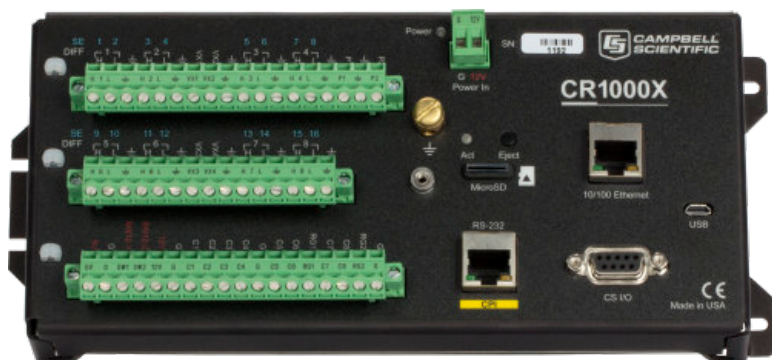
```

281
282
283
284 'Registro Horario de la Orientacion de la Direccion del Viento (WindDir) segun
285 'la rosa de vientos.
286 'Elaborado por Juan Caycho B. Nov-2010.
287 '.....
288 If (Cal_01.WindDir(1,1))>=0.0 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<11.25 Then
289     WD_hr="N"
290 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=11.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<33.75 Then
291     WD_hr="NNE"
292 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=33.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<56.25 Then
293     WD_hr="NE"
294 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=56.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<78.75 Then
295     WD_hr="ENE"
296 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=78.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<101.25 Then
297     WD_hr="E"
298 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=101.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<123.75 Then
299     WD_hr="ESE"
300 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=123.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<146.25 Then
301     WD_hr="SE"
302 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=146.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<168.75 Then
303     WD_hr="SSE"
304 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=168.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<191.25 Then
305     WD_hr="S"
306 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=191.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<213.75 Then
307     WD_hr="SSW"
308 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=213.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<236.25 Then
309     WD_hr="SW"
310 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=236.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<258.75 Then
311     WD_hr="WSW"
312 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=258.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<281.25 Then
313     WD_hr="W"
314 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=281.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<303.75 Then
315     WD_hr="WNW"
316 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=303.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<326.25 Then
317     WD_hr="NW"
318 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=326.25 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<348.75 Then
319     WD_hr="NNW"
320 ElseIf (Cal_01.WindDir(1,1))>=348.75 AND (Cal_01.WindDir(1,1))<=360 Then
321     WD_hr="N"
322 EndIf
323
324 CallTable(MET_HORARIO)
325 CallTable(MET_DIARIO)
326 NextScan
327
328 EndProg
329 '## FIN PROGRAMA ##

```

ANEXO E

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REGISTRADOR DATOS PARA UNA EMA



Datalogger insignia

Preciso, robusto, fiable

Resumen

El CR1000X es nuestro datalogger buque insignia de propósito general, diseñado para ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones en medida y control. El CR1000X es lo suficientemente robusto para uso en condiciones extremas, con una fiabilidad que lo convierte en una excelente opción para aplicaciones medioambientales remotas, como estaciones meteorológicas, sistemas mesonet, perfiles de viento, monitorización calidad del aire, sistemas hidrológicos, monitorización calidad del agua y estaciones hidrometeorológicas.

El CR1000X es un dispositivo de muy bajo consumo, que mide las señales de sensores, controla las telecomunicaciones, analiza los datos, controla dispositivos externos y almacena datos y programas en su propia memoria no volátil. La electrónica está protegida contra la radiofrecuencia mediante una exclusiva carcasa sellada de acero inoxidable. El reloj interno se mantiene con una pila de respaldo. Se programa mediante el lenguaje de alto nivel CRBasic, igual que todos nuestros dataloggers, y que permite implementar rutinas para procesamiento y análisis de los datos.

Ventajas y características

- › Funcionamiento en condiciones extremas, rango estándar de -40°C a +70°C, y extendido opcional de -55°C a +85°C
- › Conexión directa a puerto USB ordenador
- › Alta velocidad de muestreo de señales analógicas de hasta más de 300Hz
- › Alta resolución en las medidas analógicas de voltaje mediante convertidor A/D de 24 bit
- › Incluye dos canales de medida exclusivos para señales 0-20 mA o 4-20 mA
- › Puerto CPI para conexión de módulos distribuidos CDM de Campbell Scientific
- › Toma Ethernet RJ45
- › Ranura para tarjeta microSD para ampliación de memoria
- › Comunicaciones serie con dispositivos y sensores mediante SDI-12, RS-232, y/o RS-485
- › Soporta enrutamiento PakBus
- › Página web embebida

Descripción detallada

El CR1000X es un dispositivo electrónico de bajo consumo diseñado para medir señales de sensores, gestionar conexiones directas y por telecomunicaciones, analizar datos, controlar dispositivos externos, y con almacenamiento interno no volátil para guardar datos y programas. La electrónica queda protegida de interferencias RF y fallos dentro de un cartucho sellado en acero inoxidable. El reloj

está salvaguardado con una pila de respaldo interna. El lenguaje de programación CRBASIC -común a todos los dataloggers Campbell Scientific- permite programar el procesamiento y análisis de datos.

El panel de conexiones del CR1000X incluye dos terminales de salida 12 V configurables por software, terminales de

tierra distribuidos por los 16 terminales analógicos y bloques de terminales removibles.

Especificaciones

-NOTE- Additional specifications are listed in the CR1000X Specifications Sheet.

Operating Temperature Range	<ul style="list-style-type: none"> › -40° to +70°C (standard) › Non-condensing environment › -55° to +85°C (extended)
Maximum Scan Rate	1000 Hz
Case Material	Anodized aluminum
Analog Inputs	16 single-ended or 8 differential (individually configured). Two analog inputs can measure 4 to 20 mA or 0 to 20 mA natively. Four analog inputs can provide pulse/digital I/O functions.
Pulse Counters	10 (P1 to P2 and C1 to C8)
Voltage Excitation Terminals	4 (VX1 to VX4)
Maximum Source/Sink Current	<ul style="list-style-type: none"> › ±40 mA (voltage excitation) › 50 mA (switched regulated)
Communications Ports	<ul style="list-style-type: none"> › RS-422 › Ethernet › USB Micro B › CS I/O › RS-232 › CPI › RS-485
Data Storage Ports	microSD
Switched 12 Volt	2 terminals
Digital I/O	8 terminals (C1 to C8) configurable for digital input and output. Includes status high/low, pulse width modulation, external interrupt, edge timing, switch closure pulse counting, high-frequency pulse counting, UART, RS-232, RS-485, SDM, SDI-12, I2C, and SPI function. Terminals are configurable in pairs for 5 V or 3.3 V logic for some functions.

Input Limits	±5 V
Analog Voltage Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> › ±(0.04% of measurement + offset) at 0° to 40°C › Accuracy specifications do not include sensor or measurement noise. › ±(0.08% of measurement + offset) at -55° to +85°C (extended temperature range) › ±(0.06% of measurement + offset) at -40° to +70°C
ADC	24-bit
Power Requirements	10 to 18 Vdc input
Real-Time Clock Accuracy	±3 min. per year (Optional GPS correction to ±10 μs)
Internet Protocols	Ethernet, PPP, RNDIS, ICMP/Ping, Auto-IP (APIPA), IPv4, IPv6, UDP, TCP, TLS (v1.2), DNS, DHCP, SLAAC, Telnet, HTTP(S), SFTP, FTP(S), POP3/TLS, NTP, SMTP/TLS, SNMPv3, CS I/O IP, MQTT
Communication Protocols	CPI, PakBus, SDM, SDI-12, Modbus, TCP, DNP3, UDP, NTCIP, NMEA 0183, I2C, SPI, and others
Battery-backed SRAM for CPU Usage & Final Storage	4 MB
Data Storage	4 MB SRAM + 72 MB flash (Storage expansion of up to 16 GB with removable microSD flash memory card.)
Idle Current Drain, Average	< 1 mA (@ 12 Vdc)
Active Current Drain, Average	<ul style="list-style-type: none"> › 55 mA (20 Hz scan @ 12 Vdc) › 1 mA (1 Hz scan @ 12 Vdc)
Dimensions	23.8 x 10.1 x 6.2 cm (9.4 x 4.0 x 2.4 in.) Additional clearance required for cables and leads.
Weight	0.86 kg (1.9 lb)

Para más detalles visite: www.campbellsci.es/cr1000x 



Avda. Pompeu Fabra 7-9, local 1, 08024, Barcelona, Spain | (+34) 93 2323938 | info@campbellsci.es | www.campbellsci.es
AUSTRALIA | BRAZIL | CANADA | CHINA | COSTA RICA | FRANCE | GERMANY | INDIA | SOUTH AFRICA | SPAIN | THAILAND | UK | USA